

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
METALURŠKI FAKULTET

Filip Skender

ZAVRŠNI RAD

Sisak, rujan 2018.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
METALURŠKI FAKULTET

Filip Skender

UTJECAJ MIKROSTRUKTURE I BRZINE DEFORMACIJE NA POČETAK  
HLADNE DEFORMACIJE ČELIKA MIKROLEGIRANOG NIOBIJEM

ZAVRŠNI RAD

Voditelj: prof.dr.sc. Stoja Rešković  
Stručni voditelj: Tin Brlić, mag.ing.met.

Članovi Povjerenstva za ocjenu i obranu završnog rada:

izv. prof.dr.sc. Ljerka Slokar- predsjednik  
prof.dr.sc. Stoja Rešković - član  
doc.dr.sc. Ivan Jandrlić - član  
doc.dr.sc. Ivan Ivec – zamjenski član

Sisak, rujan 2018.



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
METALURŠKI FAKULTET

UNIVERSITY OF ZAGREB  
FACULTY OF METALLURGY

IME: FILIP

PREZIME: SKENDER

MATIČNI BROJ: BM- 3541/15

Na temelju članka 19. stavak 2. Etičkog kodeksa Sveučilišta u Zagrebu dajem sljedeću

## IZJAVU O IZVORNOSTI

Izjavljujem da je moj završni pod naslovom:

Utjecaj mikrostrukture i brzine deformacije na početak hladne deformacije  
čelika mikrolegiranog niobijem

izvorni rezultat mogeg rada te da se u izradi istoga nisam koristio drugim izvorima osim onih koji su u njemu navedeni.

Sisak, 10.09.2018

\_\_\_\_\_  
(vlastoručni potpis)

\_\_\_\_\_  
*Izrazi koji se koriste u ovoj Izjavi, a imaju rodno značenje, koriste se neutralno i odnose se jednako i na ženski i na muški rod.*

Ovaj rad je financiran od strane Hrvatske zaklade za znanost projektom HRZZ IP-2016-06-1270 „Istraživanja početka plastičnog toka metala kod hladne deformacije“. Voditelj projekta je prof.dr.sc. Stoja Rešković. Na navedenom projektu sam suradnik od 27.4. do 31.9.2018.. Web stranica projekta je: [steeldeform.simet.hr](http://steeldeform.simet.hr).

## **ZAHVALA**

Posebnu zahvalu dugujem svojoj mentorici prof.dr.sc. Stoji Rešković koja mi je omogućila svu potrebnu opremu i uzorke za izradu rada, kao i pomogla svojim znanjem, iskustvom i stručnim savjetima pri izradi ovog završnog rada, također se zahvaljujem na strpljenju i odvojenom vremenu kako bi završili rad.

Zahvaljujem se svim svojim prijateljima, koji su uvijek bili uz mene i vjerovali u mene. Bez njih cijeli moj studij ne bi prošao tako zabavno.

Veliku zahvalu iskazujem svojem stručnom voditelju Tinu Brliću, mag.ing.met koji je sa mnom proveo sate i sate u laboratoriju pripremajući i ispitivajući uzorke. Bez njegove pomoći, uloženog vremena i truda te stručnih savjeta bilo bi puno teže izraditi ovaj završni rad.

Želim se zahvaliti i cijeloj svojoj obitelji koja me je uvijek podržavala i upućivala na pravi put.

Na kraju, najveću zaslugu ipak želim iskazati svojim roditeljima. Oni su bili uz mene u dobru i zlu i uvijek mi svojim savjetima i postupcima pokušavali olakšati život i školovanje, oni su zaslužni za sve što sam do sad u životu postigao jer su mi davali najveću snagu i vjetar u leđa.

Veliko HVALA svima!

## SAŽETAK

### **Utjecaj mikrostrukture i brzine deformacije na početak hladne deformacije čelika mikrolegiranog niobijem**

Čelik je danas najrasprostranjeniji materijal u svijetu. Istraživanja su pokazala kako mikrolegirani čelici sa titanom ili niobijem imaju bolja mehanička svojstva od ostalih čelika. Dobra mehanička svojstva podrazumijevaju visoku žilavost, deformabilnost, otpornost i čvrstoću. Takva svojstva postižu se odgovarajućom kombinacijom kemijskog sastava i parametara termomehaničke obrade. U ovom radu ispitano je ponašanje niskougličnog čelika mikrolegiranog sa 0.035% niobija na početku plastičnog toka materijala. Ispitivanja su provedena statičkim vlačnim pokusom, digitalnom korelacijom slike, te metalografskim ispitivanjima. Dobiveni rezultati su pokazali da brzina razvlačenja ima utjecaj na početak plastičnog toka niobijem mikrolegiranog čelika dok mikrostrukturna ispitivanja nisu dala jasnu sliku o utjecaju mikrostrukture. Daljnja istraživanja trebala bi dati odgovore kako utječe mikrostruktura na početak plastičnog toka niobijem mikrolegiranog čelika.

Ključne riječi: digitalna korelacija slike (DIC), statičko vlačno ispitivanje, mikrostruktura, početak plastične deformacije čelika, mikrolegirani čelik.

## ABSTRACT

### **Influence of microstructure and strain rate on the beginning of cold deformation in niobium microalloyed steel**

Today, steel is the most widespread material in the world. Studies have shown that microalloyed steel with titanium or niobium have better mechanical properties than other steels. Good mechanical properties include high toughness, deformability, resistance and strength. Such properties are achieved by an appropriate combination of chemical composition and thermomechanical processing parameters. In this bachelor thesis has been examined the behavior of low-carbon steel microalloyed with 0.035% niobium on the beginning of plastic flow of material. Researches were conducted by static tensile test, digital image correlation and metallographic observation. Obtained results have shown that the stretching rate has an influence on the start of the plastic flow of niobium microalloyed steel while the microstructural observation did not give a clear insight of the influence of the microstructure. Further research should provide answers on how the microstructure influences on the beginning of the plastic flow of niobium microalloyed steel.

Key words: digital image correlation (DIC), static tensile test, microstructure, beginning of plastic flow of steel, microalloyed steel

# SADRŽAJ

<b>1. UVOD .....</b>	<b>1</b>
<b>2. TEORIJSKI DIO .....</b>	<b>2</b>
<b>2.1 Mehanička svojstva i struktura čelika mikrolegiranih niobijem.....</b>	<b>2</b>
<b>2.2 Hladna deformacija čelika mikrolegiranog niobijem .....</b>	<b>4</b>
<b>2.2.1 Utjecaj brzine deformacije na početak plastičnog toka kod hladne deformacije čelika .....</b>	<b>7</b>
<b>2.2.2 Utjecaj mikrostrukture na početak plastičnog toka kod hladne deformacije čelika .....</b>	<b>8</b>
<b>2.3 Digitalna korelacija slike (DIC) .....</b>	<b>12</b>
<b>3. EKSPERIMENTALNI DIO .....</b>	<b>13</b>
<b>3.1 Uzorci.....</b>	<b>13</b>
<b>3.2 Statički vlačni pokus .....</b>	<b>14</b>
<b>3.3 Digitalna korelacija slike .....</b>	<b>16</b>
<b>3.4 Metalografija .....</b>	<b>18</b>
<b>4. REZULTATI I RASPRAVA .....</b>	<b>21</b>
<b>5. ZAKLJUČAK.....</b>	<b>31</b>
<b>6. LITERATURA .....</b>	<b>32</b>
<b>7. ŽIVOTOPIS.....</b>	<b>34</b>

## 1. UVOD

Čelik je legura koja sadrži ugljik i željezo, te niz drugih elemenata (sumpor, mangan, silicij, fosfor, oligoelemente, plinove itd.). Pravilo je da sadržaj ugljika u čeliku bude manje od 2% [1]. U usporedbi s drugim materijalima čelik je vodeći materijal [2]. Iako se sve više razvijaju super napredni materijali, čelik je i dalje najbitniji materijal u ljudskoj civilizaciji. Pošto čelik ima veliku važnost kao konstrukcijski materijal, posvećuje se velika pažnja njegovoj kvaliteti. U tu svrhu provodi se legiranje čelika, oblikovanje deformiranjem koje može biti u hladnom ili u toplom stanju, te toplinska obrada [3].

Danas se najviše upotrebljavaju niskougljični čelici. Niskolegirani čelici sadrže udio ugljika maksimalno 0.2% i do 1.5% Mn. Mikrolegiranjem ovih čelika, postižu se znatno bolja mehanička svojstva [2,4]. Vanadij je prvi element koji se koristio za mikrolegiranje čelika, zatim titan, sve do 1970 kada počinje mikrolegiranje niobijem [5]. Niobij je uvelike povećao razvoj niskolegiranih čelika. Ovi čelici imaju visoka mehanička svojstva, dobru žilavost, deformabilnost i bolju zavarivost i mogućnost spajanja sa ostalim metalima. Dodatkom niobija u mikrolegiranom čeliku stvaraju se niobijevi precipitati koji ograničavaju rast austenitnog zrna, što znači da se uz pravilno vođenje procesa termomehaničke obrade mogu poboljšati mehanička svojstva čelika [6,7].

Čelici mikrolegirani niobijem našli su široku primjenu u izradi konstrukcija, dijelova u automobilske industriji, brodogradnji i građevinarstvu. Kod izvlačenja u hladnom stanju cijevi za amortizere u automobilske industriji iz niobijem mikrolegiranog čelika, pojavili su se problemi koji su se tada pojašnjavali s utjecajem niobijevih precipitata. Tada raspoloživim metodama ispitivanja nije se moglo sa sigurnošću utvrditi dali su niobijevi precipitati bili odgovorni za uočene probleme [2,7].

Danas, razvojem digitalne tehnologije razvijene su i nove metode ispitivanja koje daju velike mogućnosti ispitivanja ponašanja čelika tijekom deformacije.

Statičkim vlačnim pokusom ispituje se plastično i elastično ponašanje metala pri vlačnom naprezanju. Ovim ispitivanjem mogu se odrediti mehanička svojstva materijala: granica proporcionalnosti i vlačna čvrstoća, istezanje, kontrakcije [8].

U posljednje vrijeme za ispitivanje promjena u zoni deformacije tijekom statičkog vlačnog ispitivanja koristi se metoda vizioplastičnosti. Suvremenim razvojem digitalne tehnologije dolazi do razvoja metode pa je tako usavršena metoda digitalne korelacije slike DIC (Digital Image Correlation). Metoda digitalne korelacije slike kod mikrolegiranih čelika koristi se za određivanje raspodjele i iznosa deformacije u zoni deformacije. Uz suvremenu metodu digitalne korelacije slike i metodu statičkog vlačnog ispitivanja za jasniju karakterizaciju materijala koristi se i metalografija kako bi se dobio jasniji uvid u ponašanje materijala tijekom deformacije [6].

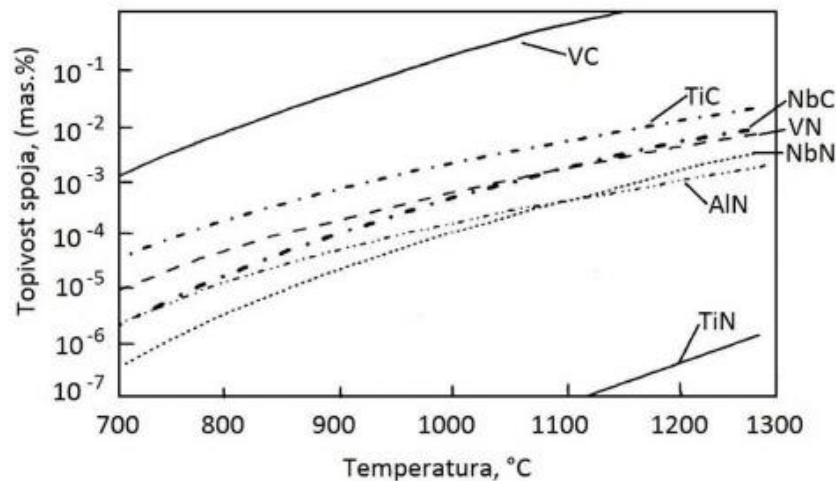
Cilj ovog rada je istražiti utjecaj brzine deformacije kao i mikrostrukture na početak plastičnog toka niobijem mikrolegiranog čelika. Istraživanja su provedena statičkim vlačnim ispitivanjem, metodom vizioplastičnosti uz digitalnu korelaciju slike (DIC) te metalografskim ispitivanjima.



## 2. TEORIJSKI DIO

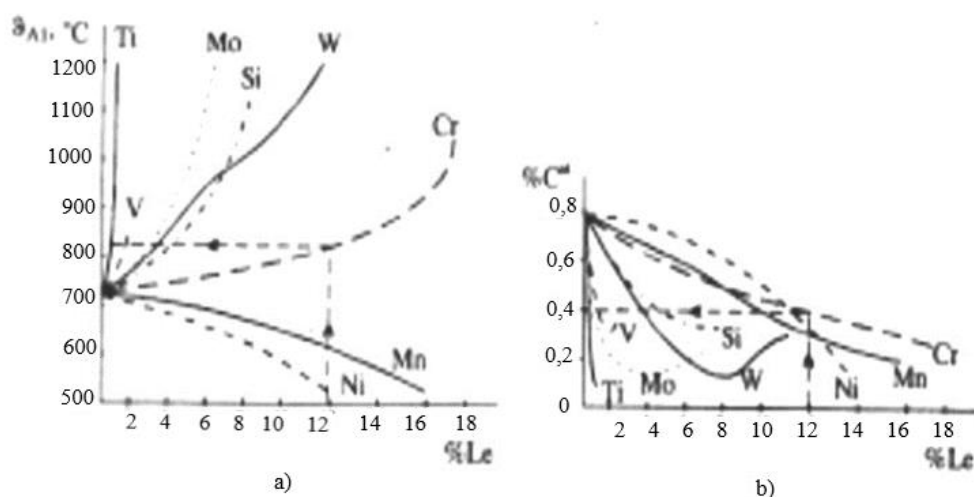
### 2.1 Mehanička svojstva i struktura čelika mikrolegiranih niobijem

Mikrolegirani čelici imaju za cilj osigurati bolja mehanička svojstva i otpornost na atmosfersku koroziju od uobičajenih ugljičnih čelika. Dobivaju se odgovarajućom kombinacijom kemijskog sastava i parametara termomehaničke obrade s ciljem da se postignu što bolja svojstva žilavosti, deformabilnosti, otpornosti i čvrstoće. Kako bi se razumio utjecaj mikrolegirajućih elemenata na mehanička svojstva, potrebno je poznavati procese između mikrolegirajućih elemenata i njihovih spojeva sa dušikom i kisikom [9]. Potrebno je poznavati topljivost određenih mikrolegirajućih elemenata kako bi se postigla potpuna topljivost u fazi zagrijavanja čelika. Slika 1 prikazuje topljivost spojeva mikrolegirajućih elemenata sa dušikom i ugljikom.



Slika 1. Topljivost spojeva mikrolegirajućih elemenata sa C i N [10]

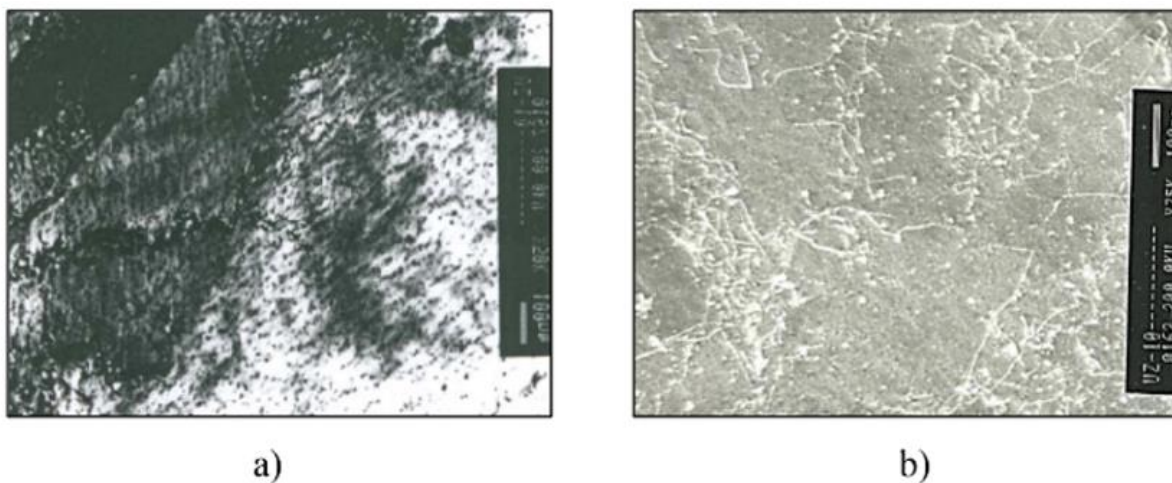
Iako se niobij smatra najboljim mikrolegirajućim elementom, svaki mikrolegirajući element ima neka specifična svojstva: titan i niobij će spriječiti rast zrna, vanadij će dovesti do očvršćavanja precipitata čelika. Također svaki element ima drugačiji utjecaj na temperaturu  $A_1$ , to je temperatura koja odgovara temperaturi fazne transformacije. Naziva se eutektoidna izoterma. Slika 2a prikazuje utjecaj legirajućih elemenata na temperaturu  $A_1$ , a slika 2b na eutektoidnu koncentraciju ugljika [3].



Slika 2. Utjecaj legirajućih elemenata: a) na temperaturu  $A_1$ , b) na eutektoidnu koncentraciju ugljika [3]

Niobijem mikrolegirani čelik je niskougljični čelik koji sadrži do 0.05 % Nb, 0.14% C i do 0.009% N [11]. Veći sadržaj ugljika štetno utječe na svojstva čelika i mijenja njegova mehanička svojstva. Odgovarajućim sadržajem ugljika i niobija te prikladnim odabirom parametara termomehaničke obrade, sa posebnim naglaskom na završnu fazu deformacije, postiže se smanjenje feritnog zrna i poboljšavaju se svojstva valjanog čelika. Niobij se veže za čestice ugljika i dušika pri čemu stvara karbide, nitrde ili karbonitride i čini prepreke kretanju dislokacija što ima utjecaj na mehanička svojstva, mehanizme rekristalizacije, faznu transformaciju i oporavak prilikom deformacije u toplom stanju [12,13].

Osim sitnog zrna, kod niobijem mikrolegiranog čelika prisutni su fini precipitati, slika 3a, koji, ako su dovoljno tvrdi, sprječavaju i blokiraju kretanje dislokacija, slika 3b. Niobijevi precipitati tijekom valjanja u toplom stanju sprječavaju rekristalizaciju. Kao rezultat nastaju jako fina feritna zrna iz austenitnih zrna [14].



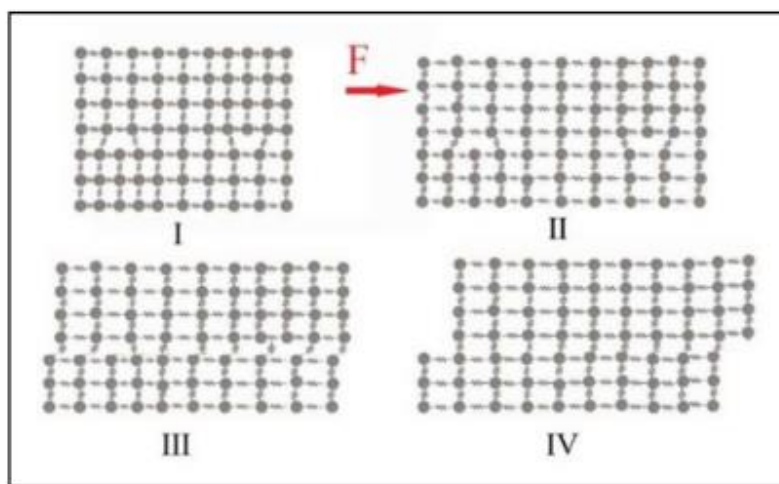
Slika 3. Niobijevi precipitati: a) Deformacijom inducirani precipitati, b) Interakcija precipitata i dislokacija [7]

Kako bi se izlučili niobijevi precipitati završno valjanje potrebno je provesti na nižim temperaturama u usporedbi sa temperaturom valjanja drugih mikrolegiranih čelika [6,11]. Završna temperatura valjanja ima veliki utjecaj na konačna mehanička svojstva niobijem mikrolegiranog čelika.

Istraživanjem [15] dokazano je kako se kod niobijem mikrolegiranog čelika javljaju nehomogene deformacije na početku plastičnog toka koje se povezuju sa Lüdersovim linijama. One se formiraju i propagiraju kroz uzorak. Tek nakon njihove propagacije kroz zonu deformacije započinje plastični tok materijala. [15,16].

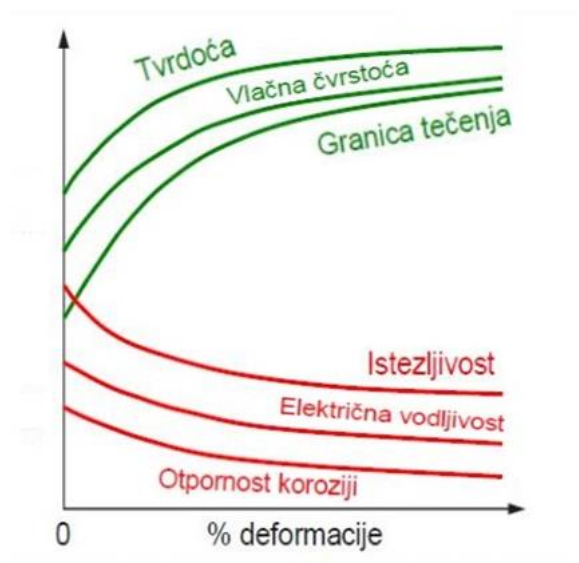
## 2.2 Hladna deformacija čelika mikrolegiranog niobijem

Ovisno o temperaturi, pri kojoj se deformacija odvija, deformaciju možemo podijeliti na deformaciju u hladnom ili toplom stanju. Deformacija u hladnom stanju provodi se na temperaturama ispod temperature rekristalizacije, a ako se deformacija odvija iznad temperature rekristalizacije onda se govori o deformaciji u toplom stanju. Tijekom procesa deformacije u hladnom stanju kod niobijem mikrolegiranog čelika javljaju se linijske greške, odnosno dislokacije. Do njihovog nastanka može doći na dva načina. Prvi je nastanak dislokacija skrućivanjem metala nakon lijevanja i takve dislokacije nemaju prevelik utjecaj na plastični tok metala. Dok dislokacije koje su nastale tijekom same plastične deformacije značajno utječu na plastični tok metala. Slika 4 prikazuje gibanje dislokacija tijekom deformacije [6,17].



Slika 4. Dislokacije i njihovo gibanje tijekom deformacije [6]

Dislokacije se međusobno sijeku, tj. poništavaju ili blokiraju. Uzrok tome je što su polikristalne ravnine klizanja tijekom deformacije različito orijentirane. Procesom kretanja dislokacija kod deformacije u hladnom stanju mijenjaju se mehanička svojstva materijala. Povećanjem stupnja deformacije materijal će imati povećanu granicu tečenja, vlačnu čvrstoću i tvrdoću, a istezljivost se smanjuje, slika 5 [17].

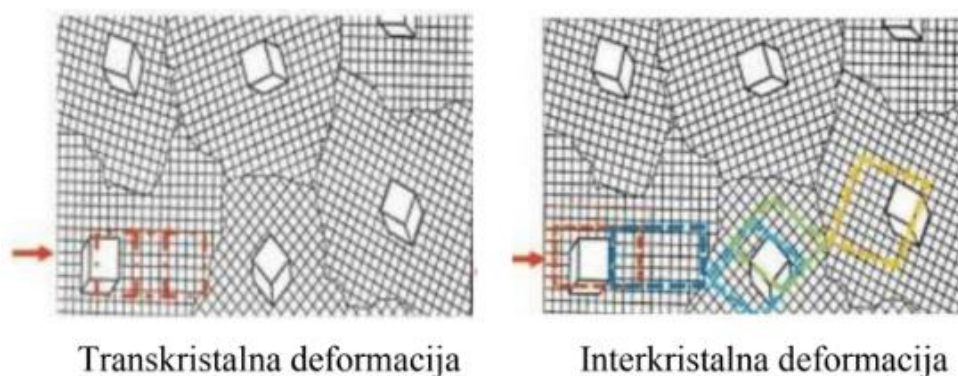


Slika 5. Promjena svojstva materijala tijekom hladne deformacije [18]

Za odvijanje deformacije u hladnom stanju potrebno je utrošiti mehaničku energiju koja potom u većem dijelu prelazi u unutarnju energiju materijala i alata, što za rezultat ima povišenje temperature. Znatno manji dio te energije pretvara se u energiju naprezanja materijala. Količina pohranjene energije ovisi o vrsti deformacije i o nekim parametrima. Što je količina pohranjene energije veća to je veći broj dislokacija u strukturi [17].

Postoje dva mehanizma plastične deformacije: translacijsko klizanje i stvaranje sraslaca, odnosno dvojnikanje. Koji će se od ova dva mehanizma, odvijati ovisi o samoj vrsti materijala. Primjerice, niskougljični čelici deformiraju se translacijskim klizanjem. Postoji 12 mogućih kliznih sustava (tri pravca i četiri ravnine klizanja). Što je broj kliznih sustava veći, to se materijal lakše plastično oblikuje [6,17].

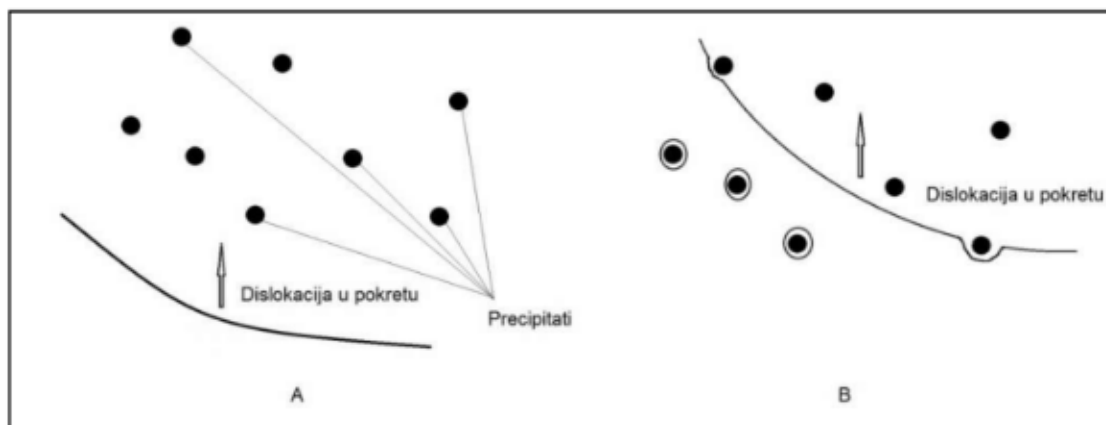
Niobijem mikrolegirani čelik ima polikristalnu strukturu čiji su kristali odvojeni granicom zrna. Obzirom na granicu zrna postoji interkristalna i transkristalna deformacija, slika 6.



Slika 6. Mehanizmi deformacije polikristala [17]

Transkristalna deformacija odvija se pomicanjem atoma unutar svakog pojedinog zrna, dok se interkristalna odvija preko većeg broja zrna unutar polikristala.

Poznato je kako precipitati predstavljaju prepreke gibanju dislokacija. Postoje dva načina kako precipitati mogu činiti prepreku i uzrokovati očvršćavanje metala. Prvi slučaj je mehanizam presijecanja čestica. U ovom slučaju dislokacije mogu savladati i presjeći precipitate, dok u drugom slučaju tvrdi i sitni precipitati predstavljaju nesavladivu prepreku u gibanju dislokacija, Orowan-ov mehanizam, slika 7 [6,11].



Slika 7. Orowan-ov mehanizam [19]

Kako bi dislokacija stvorila petlju oko precipitata i nastavila svoje daljnje gibanje potrebno je naprezanje koje se naziva Orowanovo naprezanje. Uslijed toga dolazi do očvršćavanja deformiranog materijala [20].

Polikristalna struktura građena je od više različito orijentiranih zrna. Svako zrno ima svoje linije klizanja. Tijekom procesa hladne deformacije najprije se plastična deformacija odvija u zrnima koja imaju linije klizanja pod kutem od  $45^\circ$  u odnosu na pravac djelovanja vanjske sile. Druga zrna koja nisu povoljno orijentirana tijekom deformacije se polako rotiraju i dolaze u povoljniji položaj. Plastična deformacija započinje u ostalim zrnima tek kada dođu u povoljan položaj [6,17].

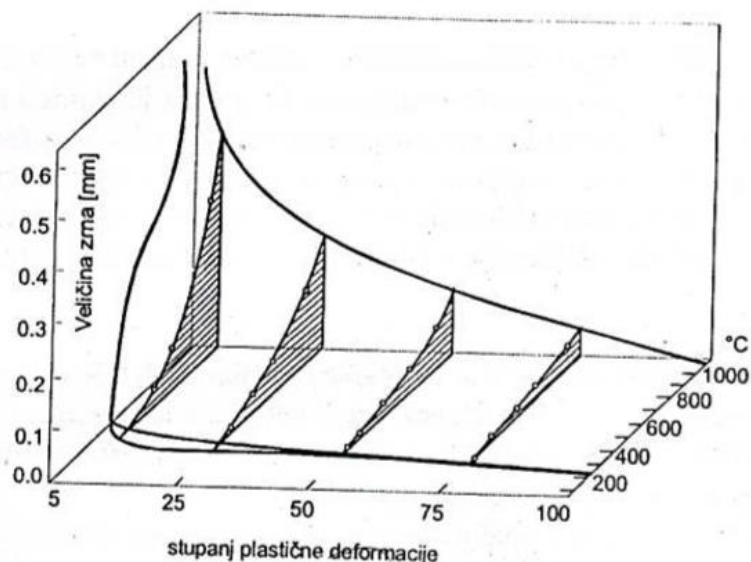
Proces hladne deformacije povećava broj dislokacija unutar metalne strukture, jer se ne odvijaju dinamički procesi (rekristalizacija i oporavak) što čini metal manje duktilnim i slabije deformabilnim. Obzirom na to materijal postaje lomljiviji, a da bi materijal ponovo postao duktilan potrebno ga je podvrgnuti procesu žarenja [17].

Kada se hladno deformirani materijal naknadno zagrijava, ovisno o temperaturi odvijat će se jedan od procesa:

- statički oporavak je proces pri kojem ne dolazi do promjene mikrostrukture, već do preraspodjele dislokacija i smanjenja naprezanja. Materijal će imati tendenciju da se vrati početnim fizičkim i mehaničkim svojstvima. Temperatura na kojoj se provodi proces oporavljanja je 0.3 temperature taljenja [17].

- statička rekristalizacija je proces stvaranja nove kristalne strukture. Iz kristaliziranog zrna sa velikom gustoćom dislokacija, nastaju nova puno sitnija zrna bez dislokacija. Temperatura rekristalizacije je 0.4 temperature taljenja [17].

Povećanjem stupnja deformacije veličina zrna se smanjuje, dok povećanjem temperature veličina zrna raste, slika 8. Kod previsoke temperature žarenja može doći do prevelikog rasta zrna što je neželjena pojava i dolazi do pojave lošijih mehaničkih svojstava materijala.



Slika 8. Ovisnost veličine zrna o stupnju deformacije i temperaturi [21]

### 2.2.1 Utjecaj brzine deformacije na početak plastičnog toka kod hladne deformacije čelika

Brzina deformacije nije isto što i brzina tehnološkog procesa deformiranja. Razlikuju se po tome što se pod brzinom deformacije smatra promjena nekog volumena u jedinici vremena, dok je brzina tehnološkog procesa deformiranja brzina kojom alat deformira materijal [22].

Općenito se pokazalo kako povećanje brzine deformacije dovodi do povećanja čvrstoće materijala. Granica proporcionalnosti je točka do koje se materijal rasteže ravnomjerno sa opterećenjem. Vlačna čvrstoća predstavlja naprezanje pri maksimalnoj sili tijekom deformacije [8,23]. Granica proporcionalnosti se intenzivnije povećava nego vlačna čvrstoća. Dolazi do povećanja omjera  $R_p/R_m$ , a kod nekih materijala taj omjer može biti veći od 1. Obzirom da je tijekom procesa deformacije dislokacijama otežano kretanje i sve više se međusobno blokiraju povećanjem stupnja deformacije dolazi do povećanja naprezanja unutar materijala, te se smanjuje plastičnost samog materijala. Svaki od ovih utjecaja ovisi o vrsti samog materijala koji se deformira [6,24]. Na brzinu deformacije jako su osjetljivi visokolegirani čelici, magnezijeve legure i legure bakra, dok su manje osjetljivi niskolegirani čelici, ugljični čelici i aluminijske legure [22].



Kod deformacije u hladnom stanju zbog brzine deformacije može doći do povećanja temperature deformiranog materijala.

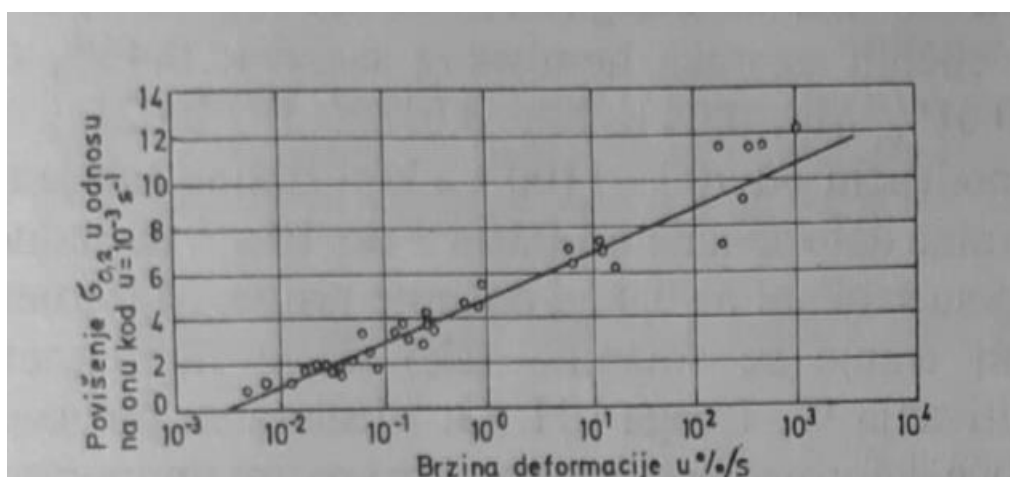
Ovisnost otpora deformacije i brzine može se prikazati formulom [6]:

$$\sigma_v = \sigma_0 + m \cdot \ln(u/u_0) \quad (1)$$

gdje su:  $\sigma_v$  i  $\sigma_0$  otpor deformaciji pri odgovarajućim brzinama  $u$  i  $u_0$ ,

$m$  je koeficijent koji ovisi o vrsti materijala.

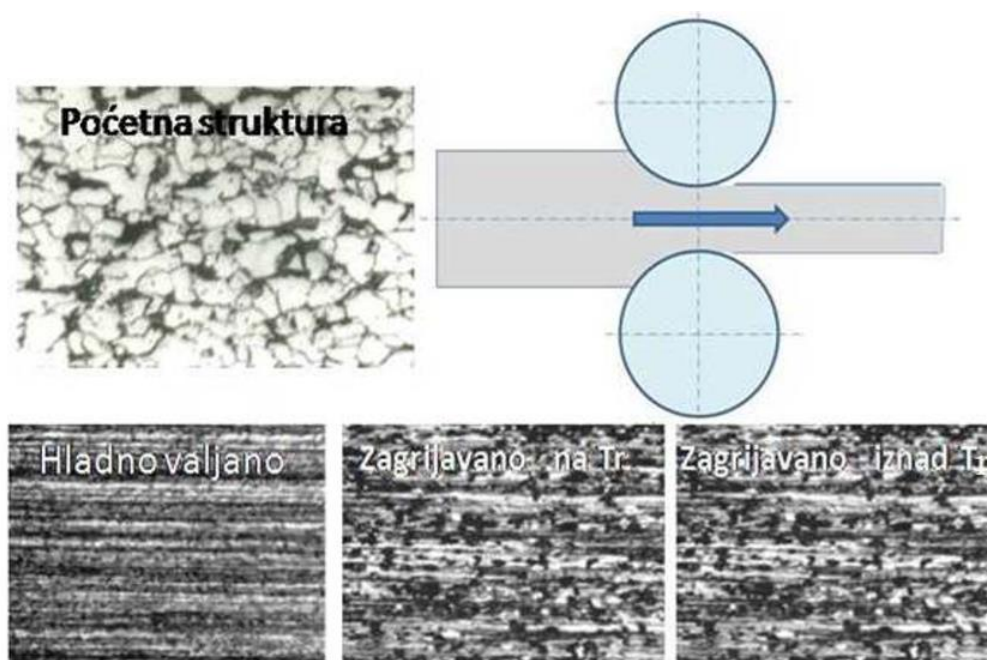
Pri deformaciji u hladnom stanju nije lako odrediti ovisnost otpora deformaciji i brzine deformacije zbog očvršćavanja metala. Utjecaj brzine deformacije na otpor deformacije u hladnom stanju prikazan je na slici 9. Kod nekih metala koji imaju nisku temperaturu rekristalizacije, već pri sobnoj temperaturi povećava se otpor deformacije sa povećanjem brzine deformacije [22].



Slika 9. Utjecaj brzine deformacije na otpor deformaciji u hladnom stanju [22]

### 2.2.2 Utjecaj mikrostrukture na početak plastičnog toka kod hladne deformacije čelika

Više od pedeset godina poznato je da se svako mehaničko svojstvo može poboljšati profinjenjem mikrostrukture. Na profinjenost mikrostrukture utječu legirajući elementi, temperatura transformacije, deformacija u hladnom i toplom stanju, način i brzina hlađenja. Promjene u mikrostrukтури kod deformacije u hladnom stanju i naknadnog zagrijavanja na temperaturu rekristalizacije i iznad temperature zagrijavanja rekristalizacije prikazuje slika 10 [25].



Slika 10. Promjena mikrostrukture kod hladne deformacije i naknadnog zagrijavanja na temperaturu i iznad temperature zagrijavanja [17,26-28]

Transformacijom austenita, feritna zrna su primarno vezana na granicama austenitnih zrna. Najfinije feritno zrno može se postići određenom brzinom hlađenja kada austenitna zrna rekristaliziraju. Dobiveno feritno zrno je znatno manje od austenitnog zrna. Smanjenje veličine zrna je ovisno o stupnju deformacije i temperaturi rekristalizacije [5,13].

Nakon gotovo pola stoljeća istraživanja postalo je jasno da mikrolegirajući elementi imaju nekoliko uloga u mikrolegiranim čelicima. Najviše utjecaja mikrolegirajući elementi imaju kod čelika sa feritno-perlitnom mikrostrukturom. Glavna funkcija mikrolegirajućih elemenata je: a) kontrolirati uvjete za usitnjenje austenitnog zrna, b) smanjiti temperaturu transformacije, c) uzrokovati očvršćavanje precipitatima [5].

Čvrstoća feritno-perlitnih čelika temelji se na smanjenju zrna i očvršćavanju precipitatima. Dodatna čvrstoća može se dobiti deformacijom u  $\alpha+\gamma$  dvofaznom području. Takvi čelici sadrže vanadij i niobij kao legirajuće elemente. Međutim ne utječu svi precipitati na povećanje čvrstoće čelika. Kod sitnih precipitata najdjelotvorniji su precipitati veličine do 10nm. Dok su precipitati veličine 40-60nm najdjelotvorniji kod čelika koji je naknadno zagrijavan. Da bi precipitati uspješno kočili dislokacije uz njihovu veličinu bitno je i da nemaju veliki stupanj disperzije [6]. Precipitati koji su se formirali u dvofaznom  $\alpha+\gamma$  području tijekom transformacije i precipitati koji su formirani u feritu tijekom hlađenja manji su i dobro raspoređeni, te zbog toga čeliku povećavaju čvrstoću [13].

Mnoga istraživanja u zadnjih trideset godina pokazala su da u feritu mogu nastati dvije vrste precipitata. Unutarfazni precipitati pri povišenoj temperaturi, slika 11, te precipitati pri sporijoj brzini hlađenja [14].





Slika 11. Unutar fazni precipitati kod NbCN čelika [14]

Feritno-perlitna mikrostruktura, slika 12, dobiva se pri temperaturi transformacije iznad 650 °C, kod čelika koji sadrže Mn [14]. Mikrostruktura niobijem mikrolegiranog čelika uglavnom je fina sitnozrnata. Takvom čeliku potreban je veći iznos naprezanja da bi započeo plastični tok materijala [6]. Deformacija se na početku odvija samo u zrnima koja su povoljno orijentirana, dok će ona nepovoljno orijentirana rotirati kako bi se dobila povoljnija orijentacija [6].



Slika 12. Feritno-perlitna mikrostruktura [29]

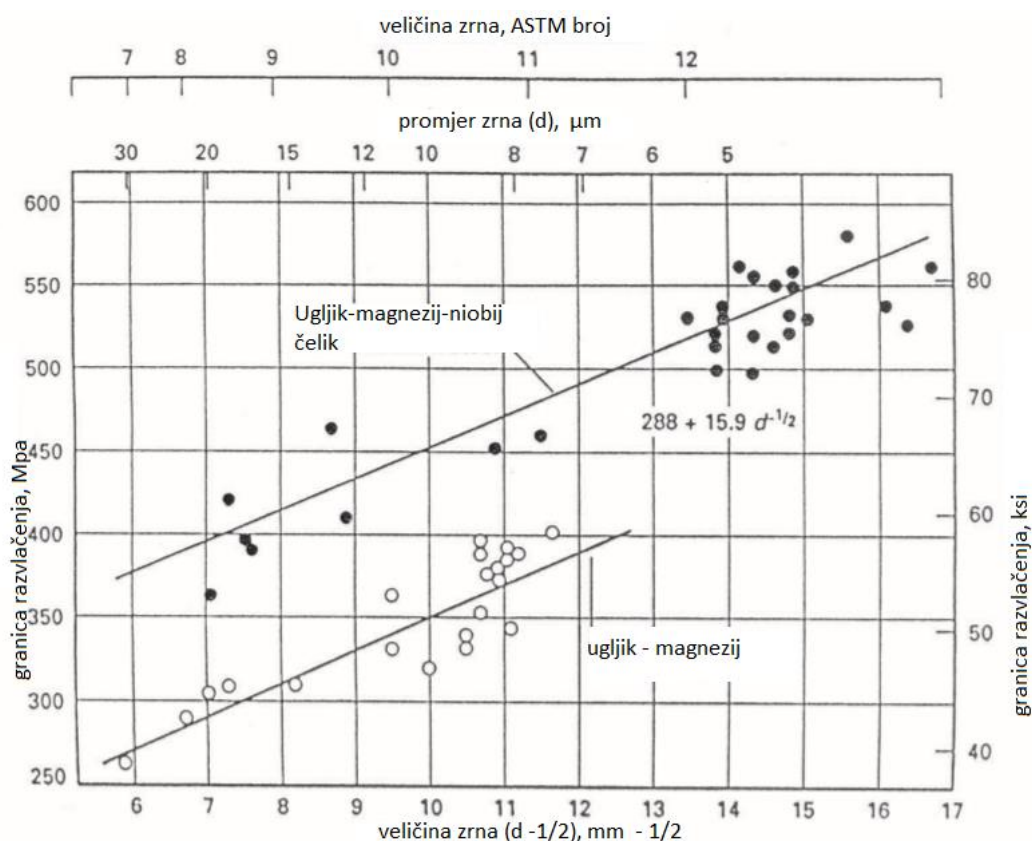
Čvrstoća feritno-perlitnih čelika može se objasniti proširenom Hall-Patch jednačbom, gdje su veličina zrna i povećanje očvršćavanja precipitatima dominantan efekt.

Hall-Patch jednadžba [8]:

$$\sigma_0 = \sigma_t + k \cdot d^{-1/2} \quad (2)$$

$\sigma_0$  – granica razvlačenja,  $\sigma_t$  – granica razvlačenja jednog kristala,  $k$  – Hall-Patch faktor,  $d$  – veličina zrna.

NbCN čelik zagrijavan na 1250°C, toplo valjan te hlađen na zraku jasno pokazuje da smanjenjem veličine zrna i povećanjem očvršćavanja materijala dolazi do porasta granice razvlačenja, slika 13 [7].



Slika 13. Eksperimentalni prikaz Hall-Patch jednadžbom utjecaja veličine feritnog zrna i očvršćavanja precipitata na granicu razvlačenja [14]

Veličina feritnog zrna ima značajan doprinos kod čvrstoće feritno-perlitnog čelika. Iako postoje različiti mehanizmi očvršćavanja kod čelika koji ima feritno-perlitnu mikrostrukturu pokazalo se da je najvažnije očvršćavanje precipitatima. Feritno-perlitni čelici osim što postižu visoku granicu razvlačenja i čvrstoću, imaju dobru tvrdoću i zavarljivost [14].

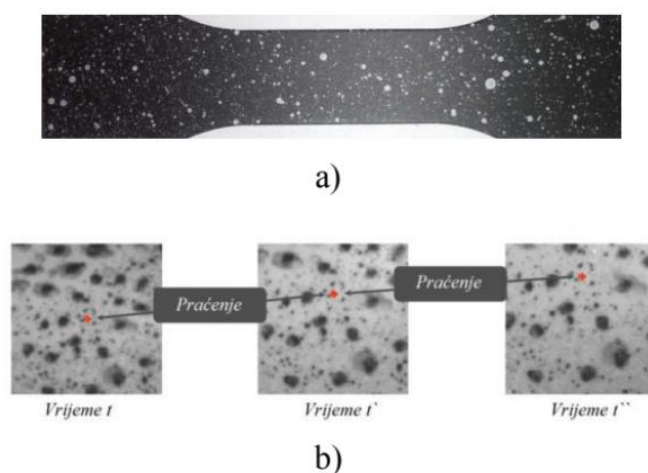
Smanjenjem i različitom orijentacijom zrna raste potrebno naprezanje za početak deformacije. Manje zrno dovesti će do veće granice proporcionalnosti i vlačne čvrstoće, ali manje plastičnosti [6].

## 2.3 Digitalna korelacija slike (DIC)

Digitalna korelacija slike je optičko-numerička tehnika mjerenja pomaka tijekom deformacije. Digitalna korelacija slike pokazala se idealnom metodom za prepoznavanje mehaničkog ponašanja materijala. Koristi se za određivanje raspodjele i iznosa deformacije u zoni deformacije [30,31].

Tehnika se temelji na računanju pomaka markera na površini ispitnog materijala. U softver se ubacuju slike koje su snimane tijekom deformacije, te se uspoređuju sa slikama snimljenim prije deformacije. Za pravilnu upotrebu ove metode ispitni materijal trebao bi biti prekriven markerima podjednake veličine, nanesenim nasumično na površinu bez preklapanja. Također je potrebno ostvariti dobar kontrast između markera i podloge. Za premaz se obično koristi crna podloga, te bijeli nasumično nanесeni markeri [30,31].

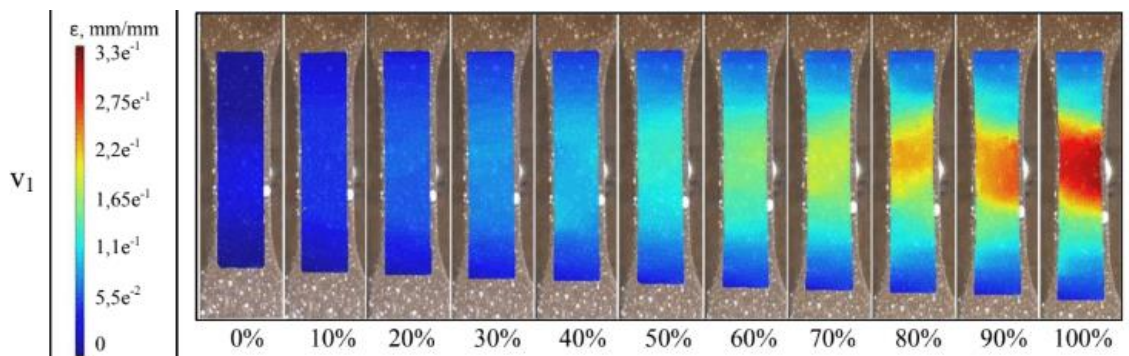
Tijekom analize postavlja se područje interesa u kojemu se uspoređuje nedeformirana slika sa slikom kod određenog stupnja deformacije. Princip preko kojeg se uspoređuje zasniva se na sivim pikselima koje kamera detektira. Svaki piksel ima određeni iznos sive boje. Tijekom procesa deformacije mijenja se razina sive boje kod određenih piksela i na taj način se dobivaju informacije o pomaku. Digitalna kamera je osnovni alat za digitalnu korelaciju slike [6,30,31]. Kamera mora biti postavljena okomito u odnosu na ispitivani uzorak i mora biti u mogućnosti snimati uzorak tijekom cijelog trajanja ispitivanja [6]. Slika 14 prikazuje pravilno pripremljen uzorak za metodu digitalne korelacije slike.



Slika 14. Uzorak za digitalnu korelaciju slike a) nasumično nanесeni markeri, b) praćenje pomaka markera [6]

Analiza se vrši unutar programskih paketa u kojima postoji više različitih korelacijskih funkcija. Najpoznatiji paketi za analiziranje su MatchID i VIC 2D [6].

Slika 15 prikazuje primjer dobivenih rezultata u programskom paketu MatchID.



Slika 15. Dobiveni rezultati metodom digitalne korelacije slike u programskom paketu MatchID [6]

### 3. EKSPERIMENTALNI DIO

Ispitivanja su provedena u Laboratoriju za obradu kovina deformiranjem u sklopu Zavoda za mehaničku metalurgiju i Laboratoriju za željezo, čelik i ljevarstvo u sklopu Zavoda za procesnu metalurgiju na Metalurškom fakultetu Sveučilišta u Zagrebu.

#### 3.1 Uzorci

Ispitivanja su provedena na uzorcima niskougličnog čelika kojemu je dodano 0.035% mikrolegirajućeg elementa niobija. Uzorci su rezani iz toplo-valjane trake. Uzorci za ispitivanja mogu biti okruglog ili pravokutnog poprečnog presjeka. U svrhu ovih ispitivanja korišteni su uzorci pravokutnog poprečnog presjeka.

Kemijski sastav uzorka ispitan je na kvantometru ARL 8660, tablica 1.

Tablica 1. Kemijski sastav čelika mikrolegiraniog sa 0.035% niobija

Element	C	Mn	Si	P	S	Al	Nb	Ni
Mikrolegirani čelik sa 0.035 mas.% niobija	0.09	0.75	0.05	0.018	0.014	0.02	0.035	0.0081

### 3.2 Statički vlačni pokus

Metodom statičkog vlačnog pokusa, ispituje se plastično i elastično ponašanje metala pri vlačnom naprezanju. Ovim ispitivanjem određena su mehanička svojstva materijala: granica proporcionalnosti, vlačna čvrstoća i istezljivost.

Priprema uzoraka za ispitivanje metodom statičkog vlačnog ispitivanja sastoji se od rezanja uzoraka iz toplovaljane trake na odgovarajuće dimenzije uzoraka. Rezanje je provedeno u Laboratoriju za željezo, čelik i ljevarstvo na Metalurškom fakultetu Sveučilišta u Zagrebu pilom JET HVBS56M-085E, slika 15. Nakon rezanja uzoraka provedena je CNC strojna obrada uzoraka na točne dimenzije, slika 16.



Slika 15. Rezanje uzorka na odgovarajuće dimenzije



Slika 16. Uzorak pravokutnog poprečnog presjeka obrađen CNC strojem

Statičko vlačno ispitivanje provodi se na kidalici. Kidalica ima čeljusti kojima se uzorak pričvrsti za ispitivanje. Način rada kidalice je taj da je jedna čeljust fiksna, a druga vlačno opterećuje i razvlači uzorak.

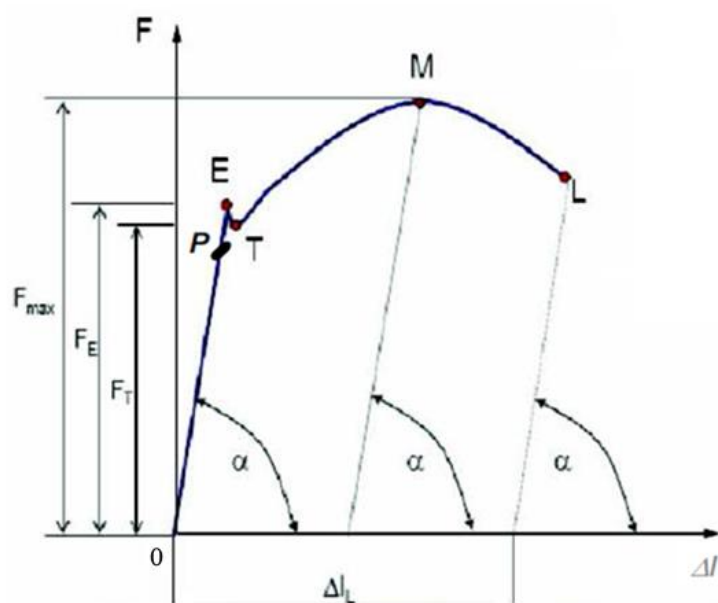


Metodom statičkog vlačnog pokusa provedena su ispitivanja na uzorcima niobijem mikrolegiranog čelika na kidalici Zwick 50 kN, slika 17. Ispitivanja su provedena pri brzinama razvlačenja 5 mm/min, 20 mm/min i 50 mm/min.



Slika 17. Kidalica Zwick 50 kN

Slika 18. prikazuje dijagram kidanja, odnosno sila ( $F$ ) - produljenje ( $\Delta l$ ).



Slika 18. Dijagram sila ( $F$ ) – produljenje ( $\Delta l$ ) [23]

0-P – u ovom području vrijedi Hookov zakon, to je područje elastične deformacije. E-M je najzanimljivije područje za metalurge obzirom da se tu odvija plastična deformacija materijala. M-L – područje opadanja sile kojom se materijal deformira pri čemu dolazi do pojave mikropukotina i formiranja vrata [23].

Granica proporcionalnosti određuje se iz dijagrama sila produljenje i iznosi [6,8,23]:

$$R_p = F_p / S_0 \quad (3)$$

gdje je:  $F_p$ -sila tečenja, N,

$S_0$ -površina poprečnog presjeka epruvete prije istezanja.

Vlačna čvrstoća određuje se [6,8]:

$$R_m = F_m / S_0 \quad (4)$$

gdje je:  $F_m$ - maksimalna izmjerena sila, N,

$S_0$ -površina poprečnog presjeka epruvete prije istezanja.

Istezljivost se računa prema omjeru [6,8,23]:

$$A = (L_k - L_0) / L_0 \quad (5)$$

gdje je  $L_0$ -početna duljina epruvete,

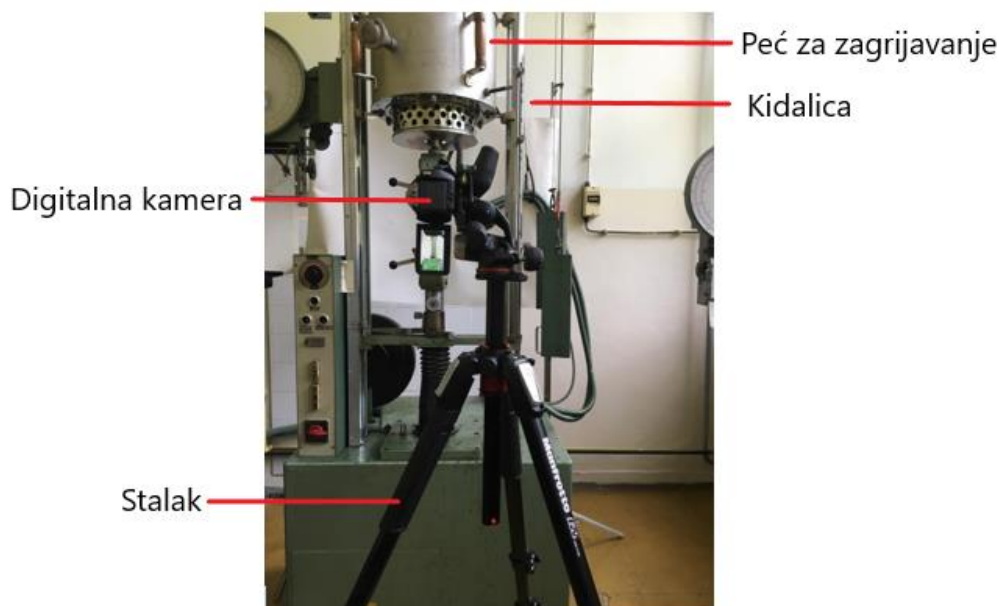
$L_k$  -duljina epruvete nakon loma.

### 3.3 Digitalna korelacija slike

Digitalna korelacija slike je metoda koja omogućuje da se iz pomaka nasumično nanesenih markera odrede iznosi promjene deformacija u određenom vremenu deformacije. Promjena deformacije se može odrediti linijski duž uzorka, u određenoj točki ili u području interesa uzorka. Za digitalnu korelaciju slike bitno je da kamera bude postavljena okomito u odnosu na ispitivani uzorak. Poželjno je da kamera ima što veći broj piksela iz razloga što se metoda bazira na principu da svaki piksel koji kamera detektira ima određeni iznos sive boje. Tijekom procesa deformacije mijenja se razina sive boje kod određenih piksela i na taj način se dobivaju informacije o pomaku. Provedenim eksperimentalnim ispitivanjem dobiju se slike koje se unose u odgovarajući programski paket koji računa iznos promjene deformacije.

Dobra priprema uzorka je od velike važnosti kod ispitivanja metodom digitalne korelacije slike. Na prethodno izbrušeni uzorak nanosi se crni mat premaz i bijeli nasumično poredani markeri. Odnos bijelo-crno daje idealan kontrast zbog kojih se pomaci nanešenih markera odlično prepoznaju u usporedbi sa početnim stanjem.

Za ispitivanje metodom digitalne korelacije slike korištena je kamera Panasonic HDC SD9 koja je bila postavljena okomito u odnosu na ispitivani uzorak, slika 19.



Slika 19. Digitalna kamera tijekom statičkog vlačnog ispitivanja na kidalici

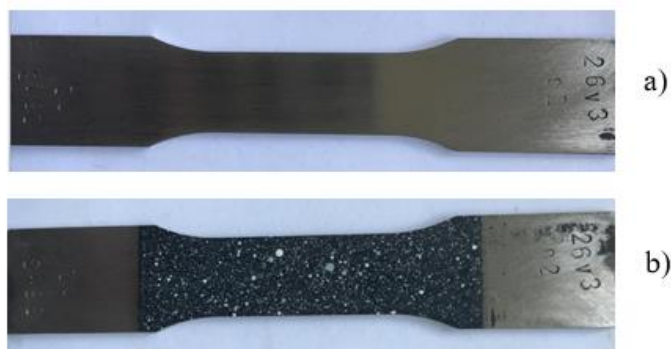
Prije samog početka ispitivanja provedena je kalibracija digitalne kamere, te analiza eksperimentalnih podataka programskim paketom MatchID.

Pravilna priprema uzoraka za ispitivanje metodom digitalne korelacije slike podrazumijeva dobro izbrušen uzorak kako bi se dobila glatka površina uzorka. Uzorci niobijem mikrolegiranog čelika, slika 16, brušeni su brusilicom Einhell TC-WD 150/200, slika 20. Zatim su ručno brušeni brusnim papirom gradacijama 40, 60 i 120. Uzorci su nakon brušenja prikazani na slici 21a. Na izbrušeni uzorak nanosi se crni mat premaz i bijeli nasumično poredani markeri na crnu površinu uzorka kako bi se ostvario vrlo dobar kontrast što je od velike važnosti kod ispitivanja metodom digitalne korelacije slike, slika 21b.



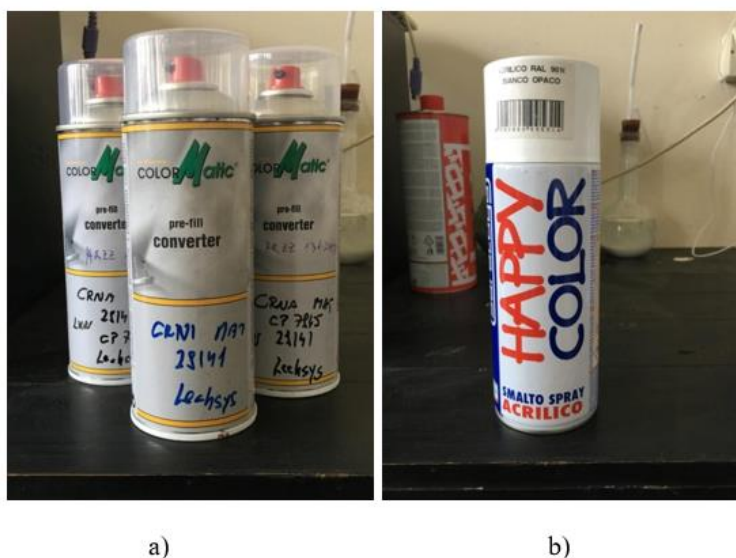
Slika 20. Brusilica Einhell TC-WD 150/200





Slika 21. Uzorak za statički vlačni pokus i DIC: a) nakon brušenja, b) nakon nanošenja premaza

Tijekom pripreme uzoraka korišten je crni mat premaz LECHSYS 29141, slika 22a, a za nanošenje bijelih markera korišten je bijeli premaz RAL 9010, slika 22b.



Slika 22. Korišteni premazi: a) crni mat premaz, b) bijeli premaz

### 3.4 Metalografija

U svrhu ispitivanja utjecaja mikrostrukture na početak plastičnog toka kod hladne deformacije mikrolegirano čelika sa dodatkom 0.035% niobija, provedena su metalografska ispitivanja na početku deformacije i kod određenog stupnja deformacije. Ispitivani uzorak podijeljen je u 6 jednakih dijelova ispitivanog mjernog područja, slika 23. Zatim je uzorak izrezan na rezalici Buehler ABRASIMET 2, slika 24.



Slika 23. Uzorak podijeljen na 6 jednakih dijelova mjernog područja



Slika 24. Uređaj Buehler ABRASIMET 2 za rezanje uzoraka kod metalografske pripreme

Uzorci su uloženi u masu Konductomet Buehler na preši SimpliMet 1000, slika 25. Nakon ulaganja uzorci su brušeni na uređaju PHOENIX BETA GRINDING/POLISHER s glavom Vector LC, papirima gradacije 120, 400, 600 uz konstantno hlađenje vodom. Zatim je provedeno poliranje na istom uređaju, slika 26, uz dodatak vodene otopine aluminijske glinice  $\text{Al}_2\text{O}_3$  u vremenu od 5 minuta. Nakon poliranja provedeno je nagrivanje otopinom nitala (5 ml  $\text{HNO}_3$  + 95 ml etanol).



Slika 25. Uređaj SimpliMet 1000 za ulaganje uzoraka toplim prešanjem



Slika 26. Uređaj PHOENIX BETA GRINDING/POLISHER s glavom Vector LC

Metalografska ispitivanja provedena su na mikroskopu Olympus GX 71 s digitalnom kamerom DP70, slika 27, uz programski paket AnalySIS Materials Research Lab.



Slika 27. Optički mikroskop Olympus GX 71 s digitalnom kamerom DP70

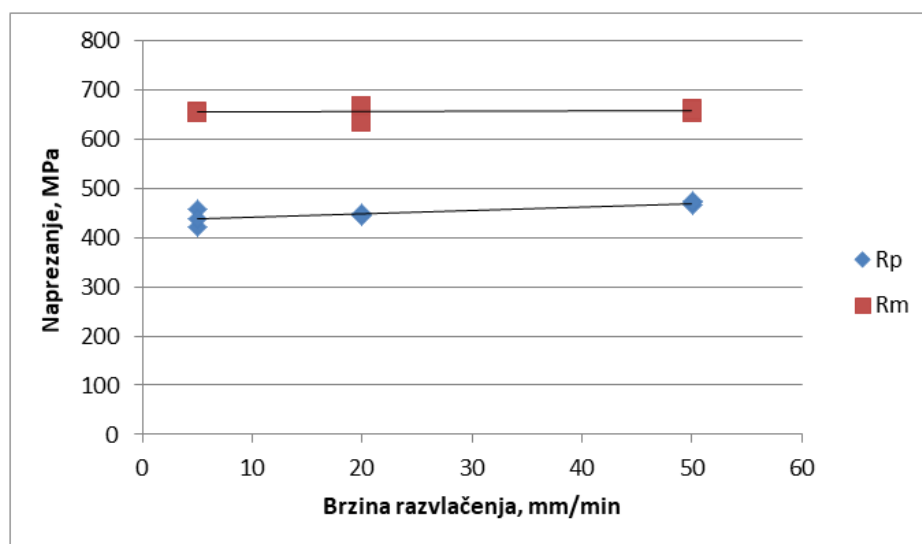
## 4. REZULTATI I RASPRAVA

Mehanička svojstva čelika dobivena provedenim eksperimentalnim ispitivanjima prikazana su u tablici 2. Određeno je izduženje ( $A$ ), vlačna čvrstoća ( $R_m$ ) i granica proporcionalnosti ( $R_p$ ).

Tablica 2. Mehanička svojstva mikrolegiranog čelika sa 0.035% niobija pri tri različite brzine razvlačenja

Uzorak	Čelik	Brzina razvlačenja, mm/min	Dimenzije uzoraka						Mehanička svojstva		
			$a_0$ , mm	$b_0$ , mm	$L_0$ , mm	$a_k$ , mm	$b_k$ , mm	$L_k$ , mm	$R_p$ , MPa	$R_m$ , MPa	$A$ , MPa
1	Čelik sa 0.035 mas.% niobija	5	2.74	19.99	45.30	1.85	16.47	53.12	421.76	655.47	17.26
2			2.60	20.02	46.36	1.47	16.74	54.09	426.84	652.43	16.67
3			2.67	20.01	45.83	1.66	16.61	53.61	424.30	653.95	16.98
4		20	2.72	19.95	45.54	1.57	17.33	53.31	445.60	666.37	17.06
5			2.65	20.02	46.01	1.64	15.79	54.27	450.71	634.50	17.95
6			2.68	20.01	46.35	1.51	16.89	54.55	445.27	666.99	17.69
7		50	2.64	19.99	45.80	1.52	17.58	54.56	466.90	653.40	19.12
8			2.60	20.06	46.47	1.69	17.36	53.24	474.88	662.58	14.57
9			2.62	20.03	46.14	1.61	17.47	53.90	470.89	657.99	16.82

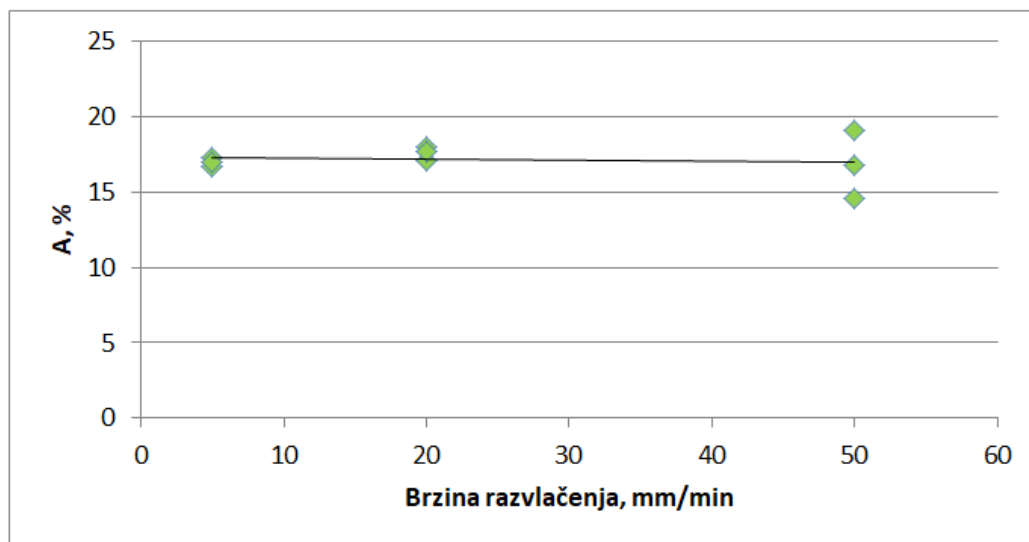
Slika 28. prikazuje promjene u iznosu naprezanja pri različitim brzinama razvlačenja. Dijagramom je uspoređeno naprezanje pri početku plastičnog toka materijala, te vlačnoj čvrstoći. Analiza je provedena pri brzinama razvlačenja 5, 20 i 50 mm/min.



Slika 28. Naprezanje pri različitim brzinama razvlačenja, u trenutku dostizanja početka plastičnog toka i vlačne čvrstoće

Iz dijagrama je jasno vidljivo kako povećanje brzine razvlačenja dovodi do povećanja naprezanja pri početku plastičnog toka materijala, dok nema značajnije razlike u promjeni naprezanja sa povećanjem brzine razvlačenja kod vlačne čvrstoće.

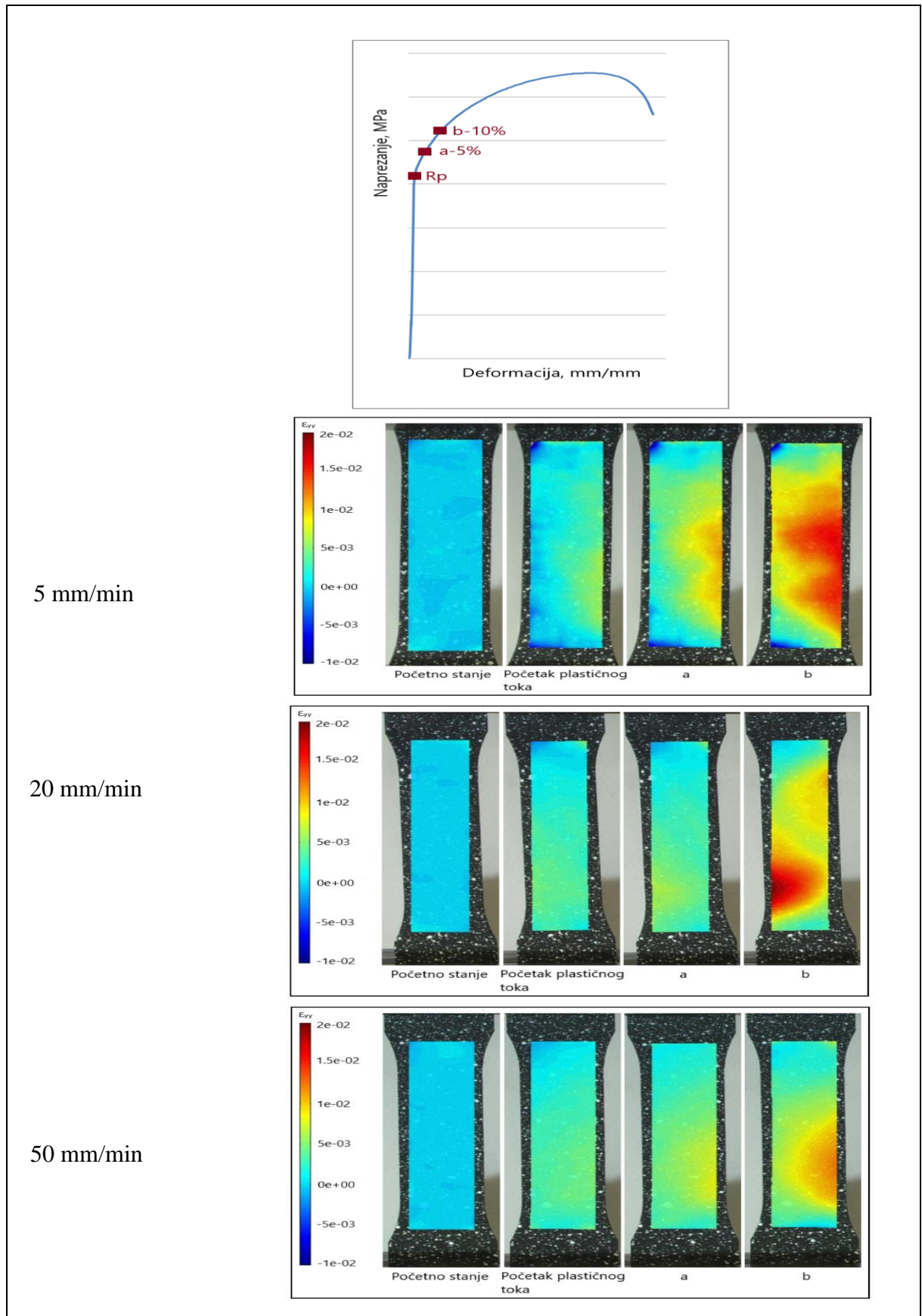
Na slici 29. prikazan je dijagram ovisnosti izduženja ispitivanog uzorka u odnosu na povećanje brzine razvlačenja.



Slika 29. Izduženje uzorka u ovisnosti o brzini razvlačenja

Iz dijagrama je vidljivo da brzina razvlačenja nema značajniji utjecaj na izduženje kod čelika mikrolegiranog niobijem. Što potvrđuje istraživanje u [4].

Metodom digitalne korelacije slike provedena je kvalitativna i kvantitativna analiza promjene iznosa deformacije tijekom procesa deformacije. Slika 30 prikazuje deformacijske mape čelika mikrolegiranog niobijem, odnosno kvalitativnu analizu, pri tri različite brzine razvlačenja. Iznosi deformacija prikazani su različitim bojama prema skali s lijeve strane, a prikazuju iznose deformacija pri početnom stanju, početku plastičnog toka ( $R_p$ ), pri točki a koja je izračunata i iznosi 5% deformacije materijala u odnosu na ukupnu deformaciju, te u trenutku b koji je jednak 10%-tnoj deformaciji u odnosu na ukupnu deformaciju. Deformacije u točkama a i b uzete su radi točnije usporedbe rezultata.

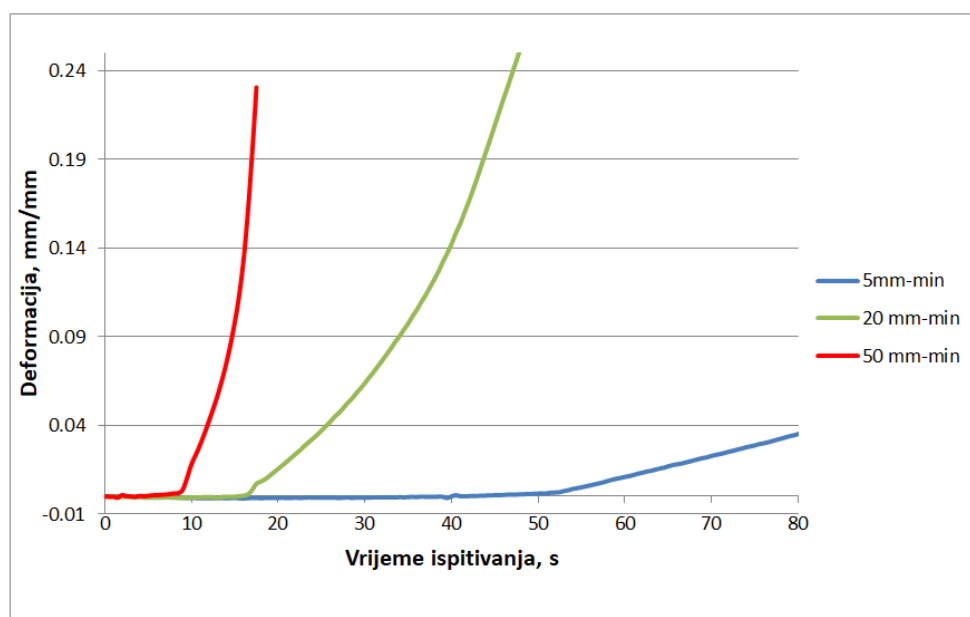


Slika 30. Promjena deformacije tijekom statičkog vlačnog ispitivanja čelika mikrolegiranog niobijem



Dobivene deformacijske mape pri 5, 20 i 50 mm/min pokazuju povećanje iznosa deformacije s povećanjem stupnja deformacije u početku plastičnog toka materijala. Također je jasno vidljivo kako iznos deformacije opada s povećanjem brzine razvlačenja. Najizraženiji je pad deformacije u točki b, gdje je vidljivo kako je deformacija pri 5 mm/min veća nego kod 50 mm/min.

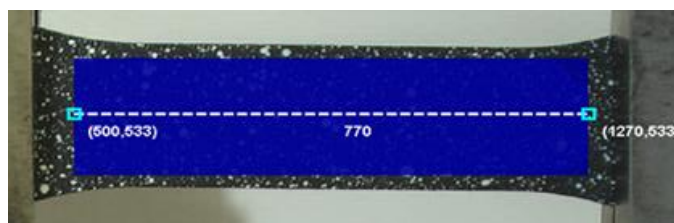
Programskim paketom MatchID odabrano je područje interesa na ispitivanom uzorku. Područje interesa odabrano je na mjestu prve pojave povećanja deformacije sa povećanjem sile razvlačenja. Na slici 31 kvantitativno je prikazan utjecaj brzine razvlačenja u odnosu na tijek deformacije u području ispitivanja.



Slika 31. Promjena deformacije tijekom tri različite brzine razvlačenja čelika mikrolegiranog niobijem

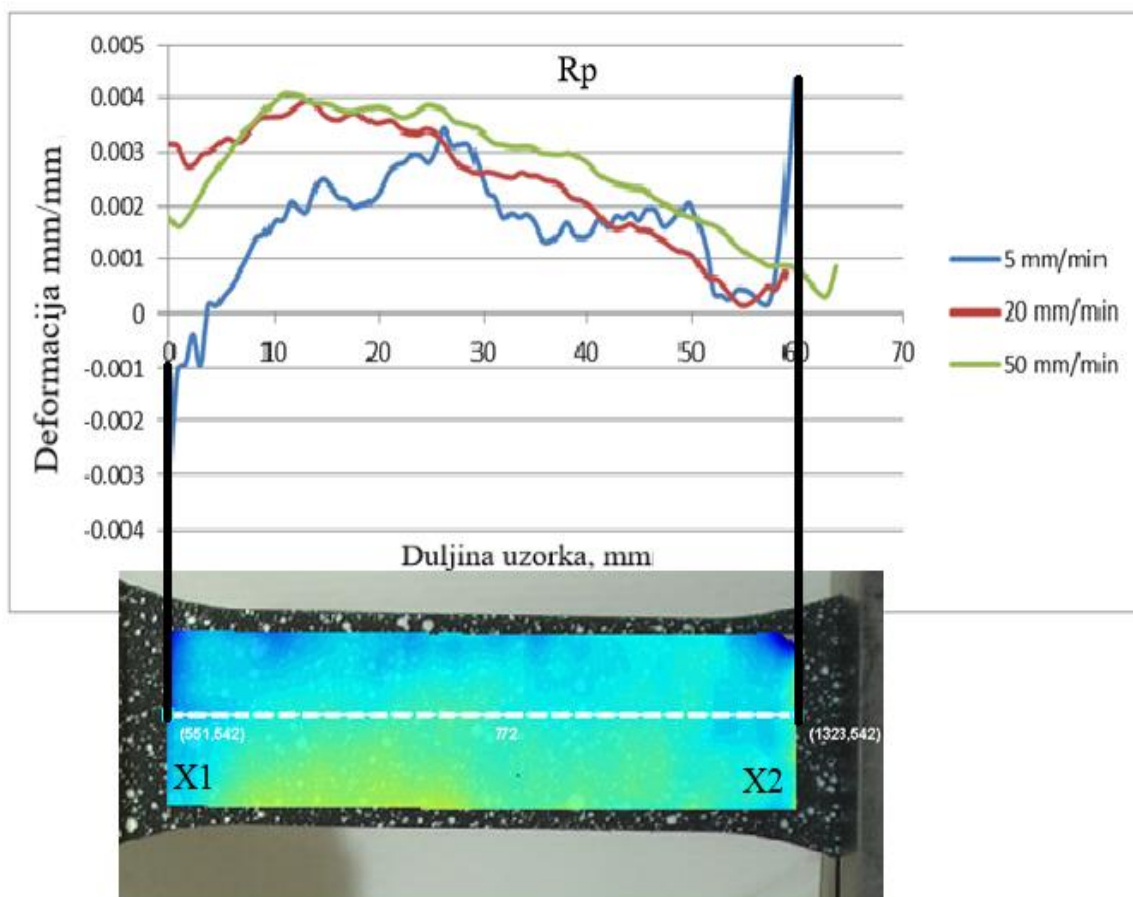
Iz dijagrama provedene kvantitativne analize vidljivo je da do početka plastičnog toka materijala prije dolazi pri većim brzinama deformacije u odnosu na manje brzine deformacije obzirom da se deformacija brže odvija pri većim brzinama razvlačenja.

Provedena je linijska analiza kako bi se jasnije dobila slika promjene deformacije sa povećanjem brzine deformacije. Način provođenja linijske analize uzorka metodom digitalne korelacije slike prikazan je na slici 32.



Slika 32. Linijska analiza promjene iznosa deformacije duž ispitnog uzorka

Utjecaj brzine deformacije u trenutku početka plastičnog toka duž ispitnog uzorka prikazan je na slici 33. Kao primjer kako se deformacija odvija u zoni deformacije, dan je uzorak koji je ispitan pri 5 mm/min. U trenutku početka plastičnog toka materijala,  $X_1$  označuje lijevi dio uzorka, a  $X_2$  desni dio uzorka.

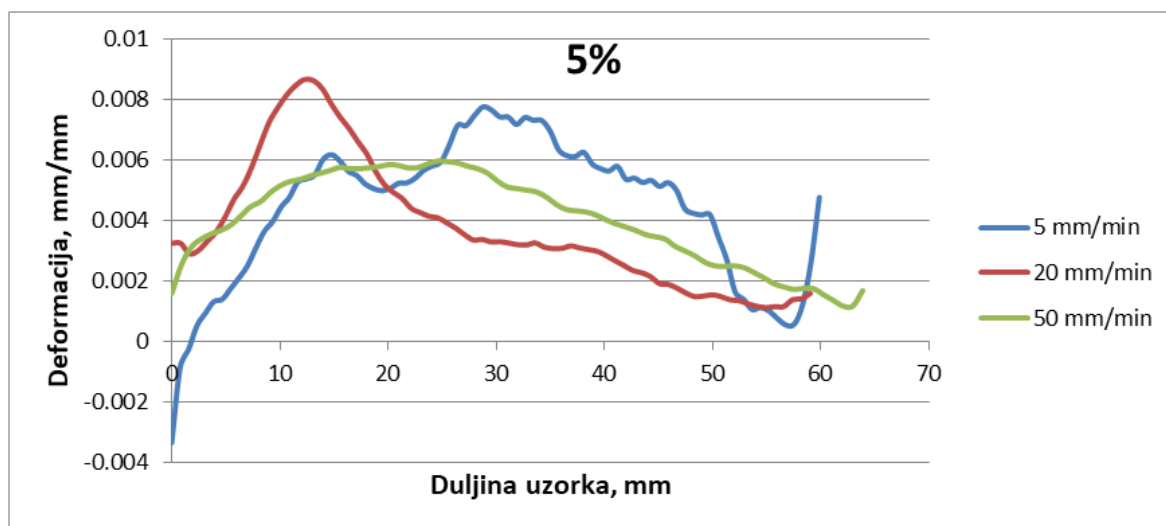


Slika 33. Dijagram promjene deformacije pri početku plastičnog toka materijala ( $R_p$ ) kod tri različite brzine razvlačenja

Sa slike 33 je vidljivo kako je kod početka plastičnog toka materijala ( $R_p$ ) deformacija uglavnom ravnomjerno raspoređena po dužini uzorka. Iznos deformacije je rastao sa porastom brzine razvlačenja.

Utjecaj brzine deformacije, u trenutku u kojem iznos deformacije iznosi 5% od ukupne deformacije, prikazan je na slici 34.

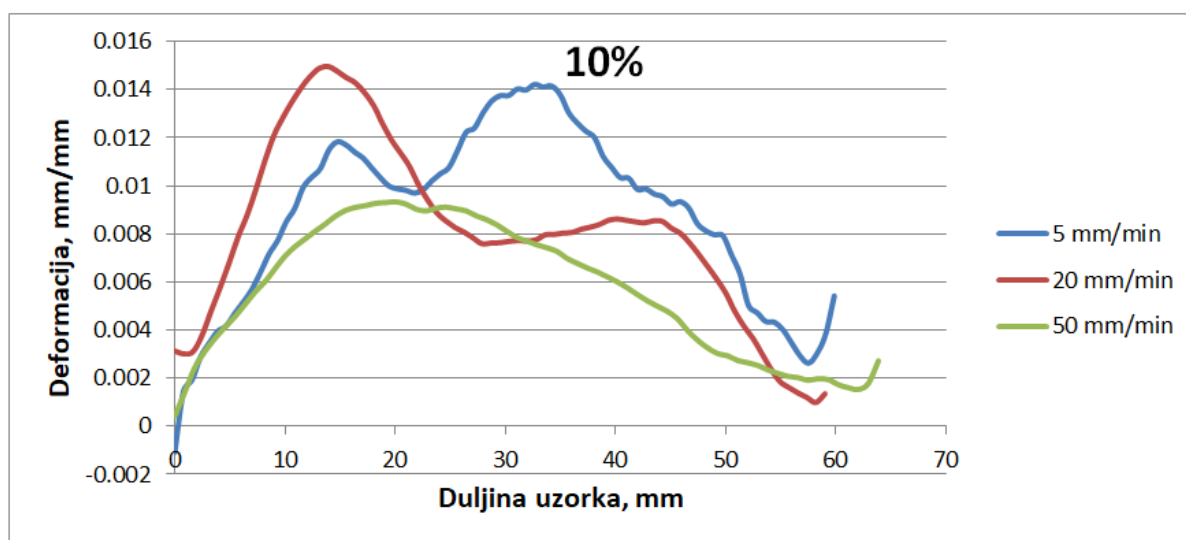




Slika 34. Dijagram promjene deformacije uzorka pri deformaciji u iznosu 5% od ukupne deformacije kod tri različite brzine razvlačenja

Kod deformacije 5% od ukupne deformacije, raspodjela deformacije u zoni deformacije nije ista. Kod manjih brzina (5 i 20 mm/min), deformacija je izraženija i odvija se na jednoj strani uzorka, dok je kod 50 mm/min homogeno raspoređena.

Utjecaj brzine deformacije, u trenutku deformacije u iznosu od 10% ukupne deformacije, prikazan je na slici 35.



Slika 35. Dijagram promjene deformacije uzorka pri deformaciji u iznosu 10% od ukupne deformacije kod tri različite brzine razvlačenja

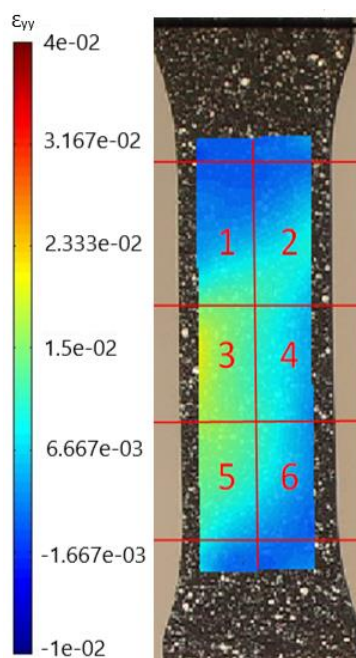
Kod deformacije 10% od ukupne deformacije također je prisutna nehomogena raspodjela deformacije po dužini zone deformacije pri brzinama razvlačenja 5 i 20 mm/min.

Pri brzini razvlačenja 50 mm/min deformacija se odvija homogeno po cijeloj zoni deformacije.

Iz dijagrama je jasno vidljivo kako je pri dostizanju početka plastičnog toka materijala najveća deformacija kod najveće brzine razvlačenja. Nakon toga deformacija raste pri najmanjoj brzini razvlačenja. Pri točkama a i b deformacija je najmanja pri najvećoj brzini razvlačenja, a pri manjim brzinama veća.

Iz slika 33, 34 i 35 vidi se raspodjela deformacija po dužini zone deformacije. Zapaženo je da kod samog početka plastičnog toka ( $R_p$ ) deformacija započinje u cijelom području zone deformacije, te je vrlo mala deformacija, prosječno 0.002 mm/mm i maksimalna 0.003 mm/mm. Iznosi deformacije su manji kod manje brzine razvlačenja. Kako brzina razvlačenja raste, raste i iznos deformacije, te je najveći kod brzine razvlačenja 50 mm/min i iznosi 0.004 mm/mm. Porastom ukupne deformacije, slike 34 i 35, utjecaj brzine razvlačenja se mijenja. Kod 10% deformacije od ukupne deformacije najveći je iznos deformacije kod brzine razvlačenja 20 mm/min u zoni deformacije

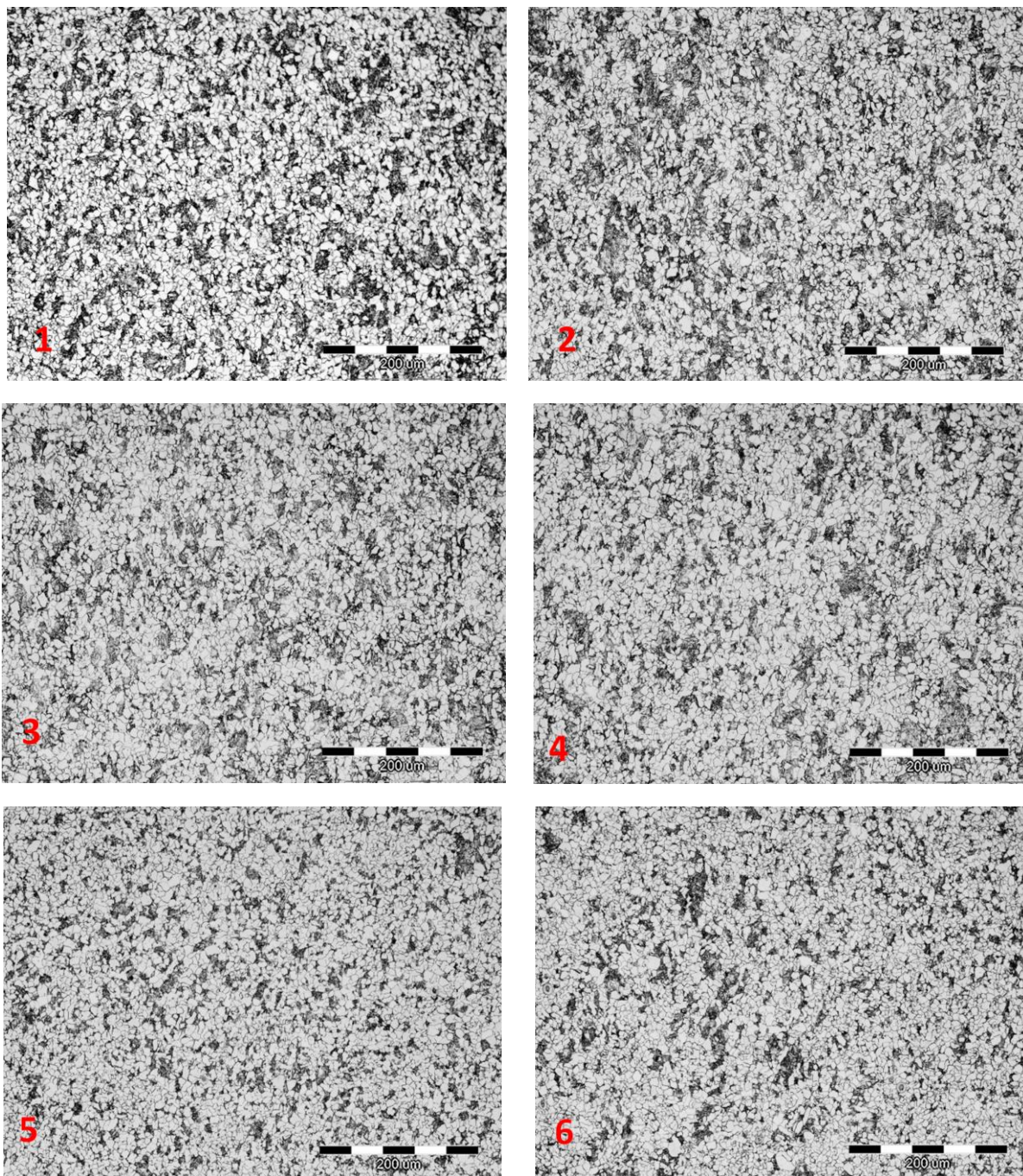
Kako bi se odredio utjecaj mikrostrukture na početak plastičnog toka niobijem mikrolegiranog čelika zaustavljeno je ispitivanje odmah nakon početka plastičnog toka materijala ( $R_p$ ). Mjerno područje uzorka podijeljeno je u 6 jednakih dijelova obzirom da postoje razlike iznosa deformacije po ispitnoj dužini uzorka, slika 36.



Slika 36. Podijela uzorka u 6 zona

Pri povećanju od 200x provedena je metalografska analiza svakog od 6 dijelova uzoraka, slika 37.



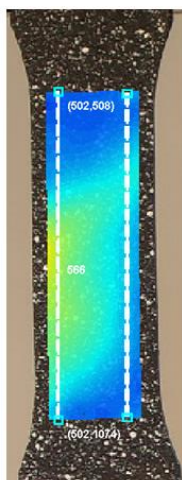


Slika 37. Mikrostruktura svake zone u trenutku zaustavljanja uzorka

Detaljnijom usporedbom mikrostrukture utvrđeno je da postoje blage promjene mikrostrukture pri slikama 3,4 i 5 obzirom da je u tim zonama najveća deformacija u trenutka zaustavljanja ispitivanja. Promjene deformacije su vrlo male te je potrebno provesti detaljniju analizu kako bi se utvrdilo ponašanje mikrostrukture kod niobijem mikrolegiranog čelika.

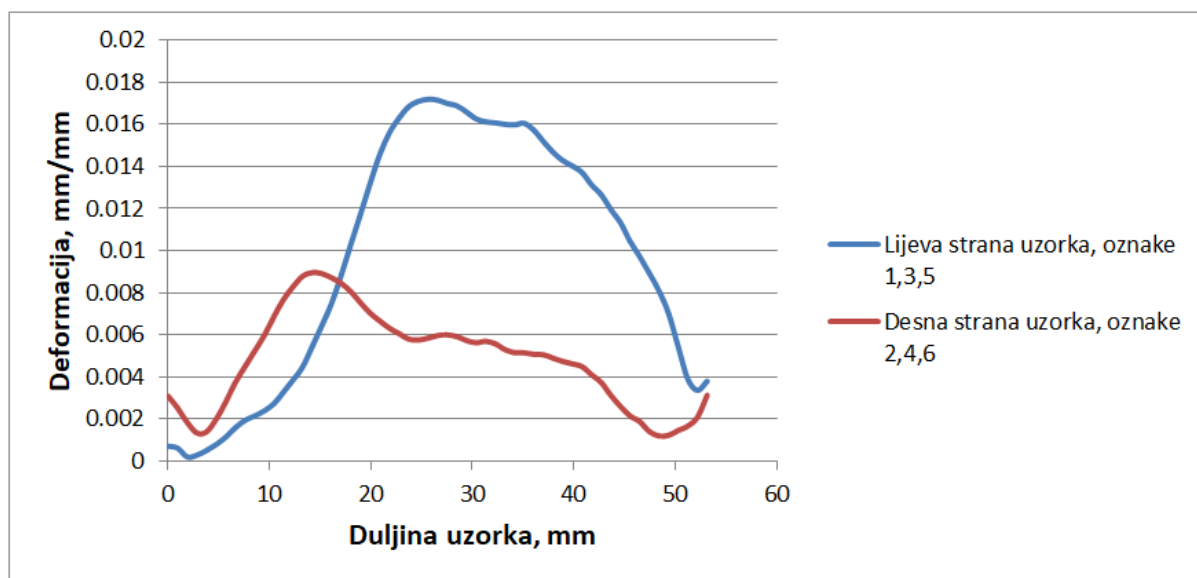
Iz deformacijske mape, slika 36, vidljivo je kako je deformacija na jednoj strani uzorka veća na jednom dijelu u odnosu na drugu stranu uzorka. Iz tog razloga provedena je linijska analiza po dužini zone deformacije.

Pomoću programskog paketa MatchID napravljene su dvije linijske analize te je određen iznos deformacije u zonama 1, 3, 5 i 2, 4, 6. Primjer uzorka za linijsku analizu prikazan je na slici 38.



Slika 38. Linijska analiza uzorka u trenutku zaustavljanja uzorka

Dijagram linijske analize uzorka u trenutku zaustavljanja uzorka, na kojem je prikazana promjena deformacije prikazuje slika 39.

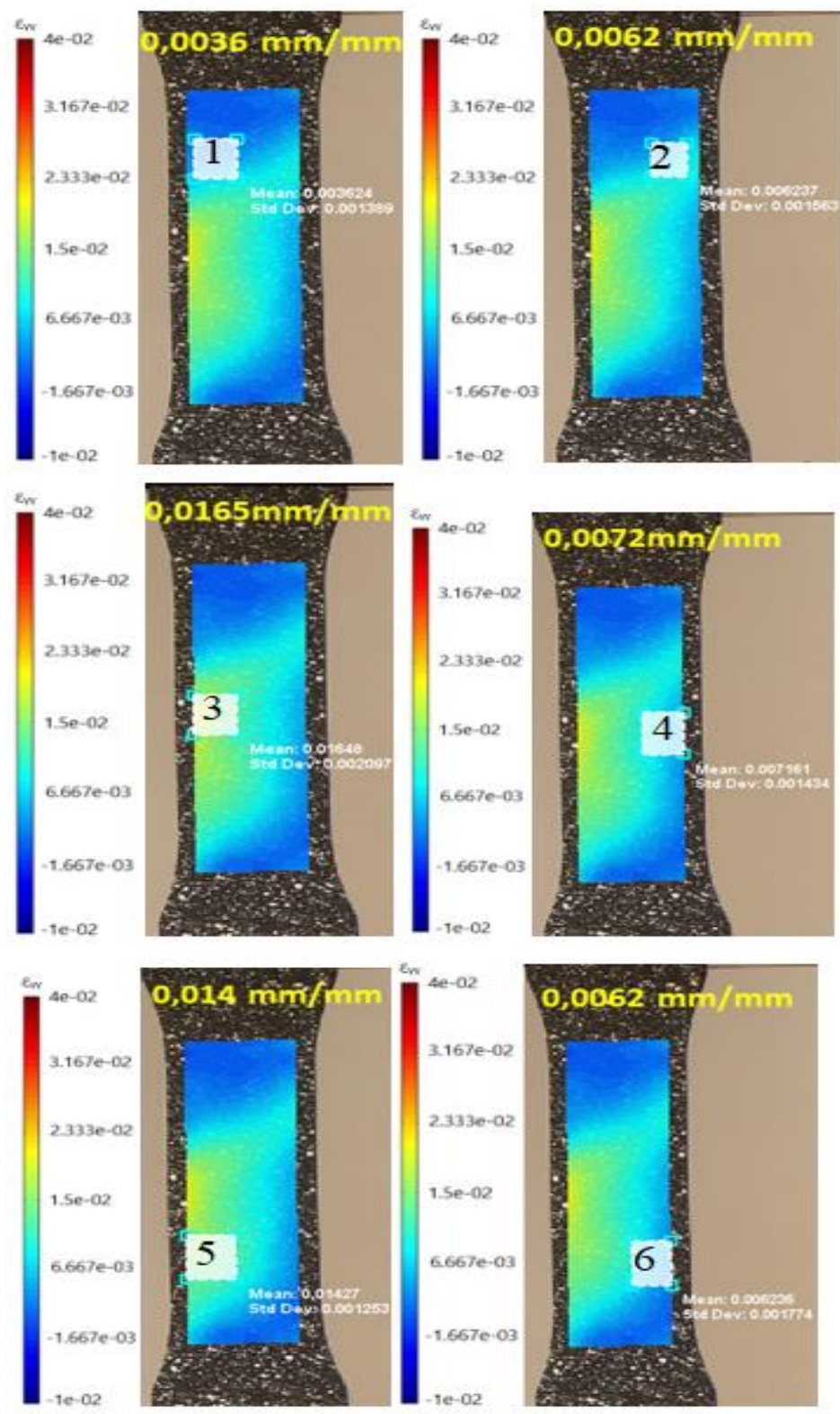


Slika 39. Dijagram promjene deformacije kod uzorka za ispitivanje mikrostrukture

Provedena linijska analiza jasno potvrđuje viđeno na mapama. Po lijevoj strani uzorka deformacija je veća u odnosu na desnu stranu uzorka. Raspodjela deformacije duž uzorka je nehomogena i najveća je na sredini lijeve strane ispitivanog uzorka.

Iz dijagrama na slici 39 je vidljivo kako je deformacija veća kod lijeve strane uzorka. Deformacija je najveća u zoni 3 što je potvrđeno detaljnijom analizom. Maksimalna deformacija dobivena metodom digitalne korelacije slike u trenutku zaustavljanja ispitivanja je 0,0165 mm/mm, slika 40.





Slika 40. Iznos deformacije u svakoj zoni u trenutku zaustavljanja ispitivanja uzorka

## 5. ZAKLJUČAK

Ispitivanja su provedena na čeliku mikrolegiranom sa 0.035% niobija. Istraživanje početka plastičnog toka materijala provedeno je istovremenim ispitivanjem statičkim vlačnim pokusom i optičkom digitalnom kamerom uz digitalnu korelaciju slike.

Analizom rezultata mjerenja statičkim vlačnim pokusom i optičkom digitalnom kamerom u programskom paketu MatchID, zaključeno je da brzina razvlačenja ima utjecaj na početak plastičnog toka materijala.

Utvrđeno je da povećanjem brzine razvlačenja dolazi do povećanja granice proporcionalnosti, odnosno do povećanja sile razvlačenja potrebne za početak plastičnog toka materijala. Brzina razvlačenja nema značajniji utjecaj na iznos vlačne čvrstoće materijala. Također, brzina razvlačenja nema značajnijeg utjecaja na izduženje materijala.

Provedena ispitivanja su pokazala kako će materijal doći do početka plastičnog toka materijala prije kod veće brzine razvlačenja. Tijekom procesa deformacije, nakon dostizanja granice proporcionalnosti, iznos deformacije opada kod većih brzina razvlačenja, dok kod manjih raste.

Istraživanja utjecaja mikrostrukture na početak plastičnog toka materijala nisu pokazali jasnu sliku o istraživanom utjecaju. Metalografska ispitivanja su pokazala da postoje blage promjene mikrostrukture na mjestima početka plastičnog toka materijala. Na tim mjestima prisutne su vrlo male deformacije, a maksimalna deformacija iznosi 0,0165 mm/mm. Razlike u ostvarenim deformacijama mogu se povezati sa zapaženim malim promjenama u mikrostrukтури.

Daljnja istraživanja trebala bi dati odgovore kako mikrostruktura utječe na početak plastičnog toka niobijem mikrolegiranog čelika.

## 6. LITERATURA

- [1] M. Gojić, Metalurgija čelika, Metalurški fakultet, Sveučilište u Zagrebu, Sisak, 2005.
- [2] S. Rešković, A. Preloščan, Vj. Novosel-Radović, Ž. Fried, Primjena čelika mikrolegiranog niobijem u proizvodnji tankostijenih šavnih cijevi za skele, Metalurgija 33 (1994) 2, 79-83.
- [3] M. Novosel, D. Krumes, Posebni čelici, Strojarski fakultet u Slavonskom Brodu, Sveučilište Josipa Juraja Strossmayera u Osijeku, Slavonski Brod 1998.
- [4] S. Jindal, R. Chibber, N. P. Mehta, Issues in welding of HSLA steel, Advanced Materials Research Vol. 365 (2012), 44-49.
- [5] L. F. Porter, P. E. Repas. The Evolution of HSLA Steels, Journal of Metals, Cincinnati, Ohio, 1982.
- [6] I. Jandrić, Raspodjela naprezanja u zoni deformacije niobijem mikrolegiranog čelika, Doktorski rad, Metalurški fakultet, Sveučilište u Zagrebu, Sisak, 2015.
- [7] S. Rešković, Studij mehanizma precipitacije i rekristalizacije u području završnog oblikovanja mikrolegiranog čelika, Doktorska disertacija, Metalurški fakultet Sisak, Sveučilište u Zagrebu, Sisak, 1997.
- [8] M. Franz, Mehanička svojstva materijala, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Sveučilište u Zagrebu, Zagreb, 1998.
- [9] D. A. Skobir, High strength low alloy HSLA steels, Materials and technology 45 (2011) 4, 295-301.
- [10] W. B. Morrison, Overview of Microalloying in Steel, The Proceedings of the Vanitec Symposium, Guilin, China 2000, The Vanadium International Technical Committee, Vanitec Limited, Westerham Kent, England, 2000., 25-35.
- [11] S. Rešković, M. Narandić, D. Kukuruzović, Mogućnost usvajanja proizvodnje toplovaljanje trake mikrolegirane niobijem u Željezari Sisak, Metalurgija 30 (1991) 4, 155-160.
- [12] S. Rešković, I. Jandrić, F. Vodopivec, Influence of testing rate on Luders band propagation in niobium microalloyed steel, Metalurgija 55 (2016) 2, 157-160.
- [13] N. J. Kim, The Physical Metallurgy of HSLA Linepipe Steels, Journal of Metals, April 1983.
- [14] A. J. DeArdo, Microalloyed Steels: Past, Present and Future, The Chinese Society for Metals, TMS 2016.
- [15] T. Brlić, S. Rešković, I. Jandrić, Study of Inhomogeneous Plastic Deformation Using Thermography, 16<sup>th</sup> International Scientific Conference on Production Engineering - CIM 2017, HUPS, Zagreb, 2017, 65-68.

- [16] T. Brlić, S. Rešković, F. Vodopivec, I. Jandrić, Luders bands at the beginning of plastic flow of material, *Metalurgija* 57 (2018) 4, 357-359
- [17] S. Rešković, Teorija oblikovanja deformiranjem, Metalurški fakultet, Sveučilište u Zagrebu, Sisak, 2014.
- [18] I. Plančić, Obrada deformiranjem, III predavanje, <https://sciencedocbox.com/Physics/76462468-Npp-odsjek-odrzavanje-univerzitet-u-zenici-masinski-fakultet-u-zenici.html> (10.07.2018)
- [19] U. Messerschmidt, Dislocation Dynamics During Plastic Deformation, Springer Material Science, 2010.
- [20] U. J. Moon, S. Kima, J. Jang, J. Lee, C. Lee, Orowan strengthening effect on the nanoindentation hardness of the ferrite matrix in microalloyed steels, *Materials Science and Engineering A* 487 (2008), 552-557.
- [21] I. Mamuzić, Teorija plastične deformacije metala, skripta, Metalurški fakultet, Sisak, 2000.
- [22] M. Čaušević, Teorija plastične prerade metala, Metalurški fakultet u Zenici, Svijetlost, Sarajevo, 1979.
- [23] S. Rešković, Ispitivanje Materijala, skripta, Metalurški fakultet, Sisak, 2009.
- [24] M. Bursak, J. Michel, Influence of strain rate on mechanical and technological properties of steel sheets, *Metalurgija* 49 (2010) 4, 317-320.
- [25] A. J. DeArdo. Microalloyed Steels: Fifty Years of Progress – An Interpretative Review. Department of Mechanical Engineering and Materials Science University of Pittsburgh, Pittsburgh, Pennsylvania 15261, USA, 2008.
- [26] D. Drobnyak, Fizička metalurgija „Fizika čvrstoće i plastičnosti 1“, Univerzitet u Beogradu, Tehnološko – metalurški fakultet, Beograd, 1981.
- [27] S. Rešković, Istraživanja autora
- [28] H. Šuman, Metalografija, Tehnološko Metalurški fakultet, Beograd, 1981.
- [29] S. Rešković, A. Preloščan, Ponašanje čelika mikrolegiranog niobijem pri termomehaničkoj obradi, *Metalurgija* 30 (1991)3, 63-73
- [30] S. Palanivelu, S. De Pauw, W. Van Paepegem, J. Degrieck, J. Van Ackeren, D. Kakogiannis, J. Wastiels, D. Van Hemelrijck, J. Vantomme, Validation of digital image correlation technique for impact loading applications, *DYMAT* 2009 (2009), 373–379.
- [31] M. De Strycker, P. Lava, W. van Paepegem, L. Schueremans, D. DeBruyne, Measuring Welding Deformations with the Digital Image Correlation Technique, Supplement to the welding journal, June 2011.



## 7. ŽIVOTOPIS

### OSOBNİ PODACI:

Ime i prezime:	Filip Skender
Datum i mjesto rođenja:	25.06.1996, Sisak
Adresa:	Ivana Cankara 6, 44000 Sisak
Telefon:	098 954 9915
Email:	<a href="mailto:filip.skender1@gmail.com">filip.skender1@gmail.com</a>

### OBRAZOVANJE

2011-2015	Športska gimnazija, Zagreb
2015 -	Sveučilište u Zagrebu Metalurški fakultet

### RADNO ISKUSTVO

2017 -	Globalna hrana d.o.o. – Radnik
--------	--------------------------------

### VJEŠTINE

Rad na računalu: Vrlo dobro poznavanje operacijskog sustava Windowse, rad u programskom paketu MS Office, Autocad, i programiranje u C++

Strani jezik:	Engleski
---------------	----------

### ZNANSTVENO ISTRAŽIVAČKE AKTIVNOSTI

HRZZ IP-2016-06-1270 „Istraživanja početka plastičnog toka metala kod hladne deformacije“- član projektnog tima